

The Journal of Manufacturing & Management Technology

วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - มิถุนายน 2569

ISSN : 2821-9597 (Online)

บทความวิจัย / บทความทางวิชาการ

- อิทธิพลของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อความต้านทานแรงดึงเดือนและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะระหว่างรอยต่อต่างชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 และอะลูมิเนียมผสม 5052
ประจักษ์ จิตกุล ยิงยศ ทิพย์ศรีราช ศราวุธ จันทรกลาง วัชระชัย จุมพา ชูติ หมอรักษา พิเชฐ หาญกล้า พิชารกร อุดร นิวัฒน์ มูเก็ม จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนาธรรณนิศา บุษคุ้ม ธิรวุฒิ เชื้อนแก้ว วรชัย มั่นศิลป์ พิชิต แก้วโกสุม และ วิชัย บุญโคง
- การประยุกต์สินสำนักงานและวิศวกรรมกระบวนการเพื่อเพิ่มผลิตภาพระบบจัดการหนังสือรับรองมาตรฐานฝีมือแรงงาน: กรณีศึกษาศูนย์ทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติแห่งหนึ่ง
บุญกิจ อุ่นพิทกุล และ เบลญจมาศ ทินบุตร
- Enhancing Supply Chain Transparency Using Blockchain Technology
Hazanal Rashid Khan Rajamohamed
- การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์
วิศิษฐ์ศรี วิยะรัตน์ ศิริชัย ต่อสกุล อภิวัฒน์ วัลภา ชวลิต อินปัญญา และ สุทธิวิธ แววดิ
- การลดความสูญเสียปลายทางพลังงานของเครื่องทำความเย็นตามแนวทางของลีน กรณีศึกษา กระบวนการผลิตสารเคลือบกระป๋องชนิดโลหะ
นิวัฒน์ จันโทกุล และ เลิศเลขา ศรีรัตน์
- การศึกษาพารามิเตอร์การสแกนสามมิติต่อความคลาดเคลื่อนการวัดขนาดชิ้นงานวัสดุอะลูมิเนียม AA6063
กฤษณะ อ่วมบุสนธิ ภาณุเดช แสงสีดา วรวิธ ปัญญาคำ และ พิชัย จันทรมณี
- การวิเคราะห์อิทธิพลของการวางตำแหน่งชิ้นงานเรขาคณิตที่มีต่อการเกิดโครงสร้างรองรับและประสิทธิภาพการพิมพ์ในกระบวนการขึ้นรูปสามมิติแบบ FDM
ศุภสิทธิ์ มะโนเครื่อง ชวกฤษ ศรีโยธิน ธิรวุฒิ แสงภาส ศุภชัย อัครนรากุล และ อติเรก ชัยนวกุล
- การลดเวลาในขั้นตอนของการขัดผิวชิ้นงานในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนจากโลหะผง
สมพงษ์ พิธียานต์ ภูริดา ปิ่นโต ธิรวุฒิ บุสโส พิชิตนน์ สุจิตธรรมกุล และ พิรวิทย์ โชคเหมา
- การเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินการศึกษาหรือของชิ้นส่วนความเร็วสูงด้วยเทคนิคการพันเคเบิลด้วยความร้อน
ธวัชธนันท์ ทิพย์เสนา เอกธัญ ใจบุญ วิษณุ แฝงเมือง ภัทรพงศ์ เกิดลาภี ณัฐชานันท์ อังศุพรณี เอกวิศว์ สงเคราะห์ สิกธิกร ทรัพย์ประดิษฐ์ วิธกร พากเพียร และ ชัยยนต์ ใจบุญมา

อิทธิพลของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนและการเกิดสารประกอบ เชิงโลหะระหว่างรอยต่อต่างชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 และอะลูมิเนียมผสม 5052 Influence of Resistance Spot Welding on Tensile Shear Strength and Intermetallic Compound Formation in Dissimilar SPFH780 Low-Alloy Carbon Steel and 5052 Aluminum Alloy Joints	1
โดย : ประจักษ์ จัตกุล ยั่งยืน ทิพย์ศรีราช ศราวุธ จันทร์กลาง วัชนะชัย จุมผา จูติ หมอรักษา พิเชฐ หาญกล้า พัชรกร อุตร นิวัฒน์ มูเก็ม จิตติวัฒน์ นิธิกาญจน์ธาร วรณนิศา นุชคุ้ม ธีรวุฒิ เชื้อนแก้ว วรชัย มั่นศิลป์ พิชิต แก้วโกสุม และ วิชัย บุญโคง	
การประยุกต์ใช้สำนักงานและวิศวกรรมกระบวนการเพื่อเพิ่มผลผลิตจากระบบจัดการหนังสือรับ รองมาตรฐานฝีมือแรงงาน: กรณีศึกษาศูนย์ทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติแห่งหนึ่ง Application of Lean Office and Process Engineering to Improve the Productivity of a Labor Skills Certificate Management System: A Case Study of a National Labor Skills Testing Center	19
โดย : บุญกิจ อุณพิกุล และ เบญจมาศ ทินบุตร	
Enhancing Supply Chain Transparency Using Blockchain Technology	34
โดย : Hazanal Rashid Khan Rajamohamed	
การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์ Design and Performance Analysis of an Automatic Mould Forming Machine for Steamed Sticky Rice	49
โดย : วิศิษฐ์ศรี วิยะรัตน์ ศิริชัย ต่อสกุล อภินันท์ วัลภา ขวลิต อินปัญญา และ สุทิวส์ แววดี	
การลดความสูญเสียเปล่าทางพลังงานของเครื่องทำความเย็นตามแนวทางของลีน กรณีศึกษา กระบวนการผลิตสารเคลือบกระป๋องชนิดโลหะ Application of Lean Principles for Energy Waste Reduction in Refrigeration Systems: A Case study of the Metal Can Coating Production Process	60
โดย : นิวัฒน์ จันโทกุล และ เลิศเลขา ศรีรัตนะ	
การศึกษาพารามิเตอร์การสแกนสามมิติต่อความคลาดเคลื่อนการวัดขนาดชิ้นงานวัสดุอะลูมิเนียม AA6063 A Study on the Effects of 3D Scanning Parameters on Dimensional Measurement Errors of Aluminum Alloy AA6063 Workpieces	69
โดย : กฤษณะ อ่วมนุสนธิ์ ภาณุเดช แสงสีคำ วรวิทย์ ปัญญาคำ และ พิชัย จันทรมณี	

การวิเคราะห์อิทธิพลของการวางตำแหน่งชิ้นงานเรขาคณิตที่มีต่อการเกิดโครงสร้างรองรับ และประสิทธิภาพการพิมพ์ในกระบวนการขึ้นรูปสามมิติแบบ FDM	84
Analysis of Part Orientation Influence on Geometric Shapes regarding Support Structure Formation and Printing Efficiency in Fused Deposition Modeling (FDM)	
โดย : ศุภสิทธิ์ มะโนเครื่อง ขวฤกษ์ สุริโยธิน อธิวัฒน์ แสงภาส ศุภชัย อัครนรากุล และ อติเรก ชัยนวกุล	
การลดเวลาในขั้นตอนของการขัดผิวชิ้นงานในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนจากโลหะผง	99
Reducing the Time Required for Surface Finishing in the Powder Metallurgy Industry	
โดย : สมพงษ์ ปริยายนต์ ภูริดา ปิ่นโต อธิชาติ นุสโส พิพัฒน์ สุจิตธรรมกุล และ พีรวิทย์ โชคเหมาะ	
การเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอของชิ้นส่วนความเร็วสูงด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อน	108
Thermal Spray Coating Enhancing the Wear Resistance Performance of High-Speed Components by Using Thermal Spray Coating Technique	
โดย : รวิธนันต์ ทิพย์เสนา เอกรัฐ ใจบุญ วิษณุ แผงเมือง ภัทรพงศ์ เกิดลาภี ณัฐชานันท์ อังศุเศรษฐี เอกวิศว์ สงเคราะห์ สิทธิกร ทรัพย์ประดิษฐ์ วีรภัทร พากเพียร และ ชัยยันต์ ใจบุญมา	



คณะกรรมการจัดทำวารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อนินท์ มีมนต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิศิษฐ์ แสง-ชูโต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรม์ณชาติ วันแต่ง

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภเอก ประมูลมาก

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญส่ง จงกลนี้

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพร ใจดำรงค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทโชติ อุดมศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์ ศรีน้อย

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทสายัน นราพินิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

รัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์นทีชัย ผัสดี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยิ่งยศ ทิพย์ศรีราช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี

รองศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ มูแก้ม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนธนะ ศรีสระคู

รัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี แสงสุริยันต์

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

ดร.สุรเชษฐ์ เกื้อนแก้วสิงห์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เลขานุการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กั้วหน้า จงวัฒนารักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



Journal of Manufacturing and Management Technology

Editorial Team

Editor-in-Chief

Assoc. Prof. Dr.Anin Memon

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi

Editorial Board

Asst. Prof. Pisit Sang-Xuto

Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

Assoc. Prof. Tannachart Wantang

Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun
Rajabhat University

Asst. Prof. Supaaek Pramoonmark

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi

Asst. Prof. Boonsong Chongkolnee

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi

Asst. Prof. Jatuporn Jaidumrong

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

Asst. Prof. Dr.Nonthachoti Udomsri

Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of
Technology Suvarnabhumi

Asst. Prof. Dr.Pisit Srinoi

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin Wang Klai Kang Won Campus

Asst. Prof. Puttasayan Narapinij

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

Asst. Prof. Nateechai Passadee

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

Asst. Prof. Yingyos Tipsrirach

Faculty of Integrated Engineering and Technology, Rajamangala
University of Technology Tawan-Ok Chantaburi Campus

Assoc. Prof. Dr.Niwat Mookam

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin Wang Klai Kang Won Campus

Asst. Prof. Dr.Poontana Sresracoo

Faculty of Industrial Technology, Buriram Rajabhat University

Asst. Prof. Dr.Montri Saengsuriyan

Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University

Dr.Surached Thuankaewsing

Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Secretary

Asst. Prof. Dr.Kaona Jongwuttanaruk

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi

วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

บทบรรณาธิการ

วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ฉบับนี้เป็นการตีพิมพ์ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม – มิถุนายน ปีพุทธศักราช 2569 จำนวนบทความตีพิมพ์ 9 บทความ โดยวารสารมีวัตถุประสงค์ที่จะรับตีพิมพ์บทความคุณภาพสูงสำหรับ นักศึกษาด้านเทคโนโลยี นักวิจัย และผู้ปฏิบัติงาน ให้เข้าใจและสามารถประยุกต์ใช้ทฤษฎีพัฒนาการปฏิบัติงานให้มี ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น วารสารรับตีพิมพ์บทความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทัศน์ทั้งที่เป็นภาษาไทยและ ภาษาอังกฤษซึ่งไม่เคยตีพิมพ์ที่ไหนมาก่อน โดยทางวารสารตีพิมพ์ 2 ฉบับต่อปี ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม – ธันวาคมซึ่งในฉบับนี้มีเนื้อหาทั้งทางด้านวิศวกรรมการผลิต กระบวนการผลิต การจัดการการผลิต และการ ดำเนินงาน วัสดุศาสตร์และการประยุกต์ใช้งาน และ โซ่อุปทานและโลจิสติกส์

กระบวนการพิจารณาบทความของวารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ บทความทุกบทความจะต้องผ่านการ พิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ตามประกาศของ ก.พ.อ เรื่องหลักเกณฑ์และวิธีการพิจารณาแต่งตั้งบุคคลให้ดำรง ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ และศาสตราจารย์ (ฉบับที่ 4) ปีพุทธศักราช 2564 ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่ง แต่ละท่านจะไม่มี การเปิดเผยชื่อกันและกันตลอดกระบวนการตรวจสอบบทความ (Double-Blind Review)

กองบรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ขอขอบคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ผู้เขียน และผู้อ่านทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความฉบับที่สองของทางวารสาร หวังเป็นอย่าง ยิ่งว่าทุก ๆ ท่านจะมีสุขภาพ พลานามัยที่แข็งแรง ปลอดภัยจากการแพร่ระบาดของไวรัส Covid-19 รวมถึงปราศจากการ โรคร้ายต่าง ๆ และยังคงติดตามการเผยแพร่ผลงานของวารสารฯ ต่อไป



รองศาสตราจารย์ ดร.อนินท์ มีมนต์
บรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฤทธิชัย สังขมทิพย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลยุทธ์ บุญแข็ง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิเรชา คำจันทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจักษ์ จัดกุล

อาจารย์ ดร.กริพัส แสงพงษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เหล่าหา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนรุญชา กำไลทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิรวัฒน์ ณ พัทลุง

รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร

อาจารย์ ว่าที่ร้อยเอก ศุภพร ศิลาลอย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชิต คงฤทธิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูไฮดี สนิ

อาจารย์ ดร.ปรเมศวร์ เป้าวรรณ

อาจารย์ ดร.ปฎิภาณ นิลเพชร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาตินักรบ แสงสว่าง

อาจารย์ ดร.พลภัทร ทิพย์บุญศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ

จังหวัดสกลนคร

คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี

วิทยาเขตจันทบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตขอนแก่น

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตขอนแก่น

คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

วิทยาเขตสาขลา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชมงคลตะวันออก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

มณฑลอุดรราชสีมา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชมงคลตะวันออก

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตขอนแก่น

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะพาณิชยศาสตร์บริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตศรีราชา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Reviewers

Asst. Prof. Ritthichai Sangkhathip	Faculty of Engineering, Pathum Wan Institute of Technology
Asst. Prof. Dr.Kulyuth Boonseng	Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University
Asst. Prof. Dr.Wirekha Khamjan	Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University, Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus
Asst. Prof. Dr.Prajak Jattakul	Faculty of Integrated Engineering and Tecnology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok Chantaburi Campus
Dr.Puripat Saenpong	Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus
Asst. Prof. Dr.Chanchai Laoha	Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus
Asst. Prof. Dr.Naranchala Khumlaithong	Faculty of Business Administration, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Salaya Campus
Asst. Prof. Chirawat Na-Badalung	School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok
Assoc. Prof. Dr.Jittiwat Nithikarnjanatharn	Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Nakhon Rachasima Campus
Mr. Supat Silaloy	School of Engineering and Inovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok
Asst. Prof. Anuchit Khongrit	Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University
Asst. Prof. Suhaidee Sani	Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

Dr.Paramet Baowan

Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Isan Khon Kaen Campus

Dr.Patiparn Ninpetch

Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Thanyaburi

Asst. Prof. Dr.Chatnugrob Sangsawang

Faculty of International Maritime Studies,
Kasetsart University Sriracha Campus

Dr.Ponlapath Tipboonsri

Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Thanyaburi

**อิทธิพลของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนและการเกิด
สารประกอบเชิงโลหะระหว่างรอยต่อต่างชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 และ
อะลูมิเนียมผสม 5052**

**Influence of Resistance Spot Welding on Tensile Shear Strength and
Intermetallic Compound Formation in Dissimilar SPFH780 Low-Alloy
Carbon Steel and 5052 Aluminum Alloy Joints**

ประจักษ์ จัตกุล^{1*} ยิงยศ ทิพย์ศรีราช¹ ศราวุธ จันทร์กลาง¹ วัชนะชัย จูมผา¹ ฐิติ หมอรักษา¹ พิเชฐ หาญกล้า¹
พัชรกร อุดร¹ นิวัฒน์ มุแกม² จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร์³ วรรณนิศา นุชคุ้ม³ ธีรวุฒิ เชื้อนแก้ว⁴
วรชัย มั่นศิลป์⁵ พิชิต แก้วโกสุม⁶ และ วิชัย บุญโง่ง⁷

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี

²สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
วิทยาเขตวังไกลกังวล

³สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
⁵แผนกวิชาช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคจันทบุรี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

⁶สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี

⁷แผนกวิชาช่างเทคนิคการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์ สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 5

Prajak Jattakul^{1*} Yingyos Thipsrirach¹ Sarawut Junklang¹ Watchanachai Joompha¹ Thiti Mhoraksa¹
Phichet Hankla¹ Patcharaporn Udon¹ Niwat Mookam² Jittiwat Nithikarnjanatharn³ Wannisa Nutkhum³
Teerawut Khuenkaew⁴ Worachai Mansilp⁵ Pichit Kaewkosum⁶ and Vichai Boonkong⁷

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Integrated Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus

²Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology Rajamangala University of
Technology Isan

⁴Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Isan,
Khon Kaen Campus

⁵Department of Welding, Chanthaburi Technical College, Institute of Vocational Education: Eastern Region

⁶Department of Electric Vehicle Engineering, Faculty of Integrated Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus

⁷Department of Production Technology, Surin Technical College, Institute of Vocational Education: Eastern

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของระดับกระแสไฟฟ้าและชนิดของพัลส์ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อสมบัติทางกลและพฤติกรรมการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 ความหนา 1.60 mm และอะลูมิเนียมผสม 5052 ความหนา 1.50 mm โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการจ่ายกระแสไฟฟ้าชนิดพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้า 11000, 11500, 12000 และ 12500 แอมแปร์ (Ampere: A) ผลการศึกษาพบว่าการเชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยชนิดพัลส์คู่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือเฉลี่ยสูงกว่าการเชื่อมด้วยชนิดพัลส์เดี่ยวในทุกๆระดับกระแสไฟฟ้า โดยเฉพาะที่ระดับกระแสไฟฟ้า 12500 A ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4534.654 N เนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่สามารถควบคุมวัฏจักรความร้อนและลดการสะสมความร้อนส่วนเกินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สามารถจำกัดการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ ที่มีความเปราะสูงให้มีความหนาที่เหมาะสมได้ดีกว่า จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการกระจายตัวของธาตุ พบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มพลังงานความร้อน ทำให้ขนาดของนิกเกิดเชื่อมขยายตัวขึ้นและเพิ่มขีดความสามารถในการรับภาระทางกลของรอยเชื่อม สรุปได้ว่ากระบวนการเชื่อมแบบพัลส์คู่เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการปรับปรุงสมบัติทางกลและควบคุมการก่อตัวของสารประกอบบริเวณรอยต่อของโลหะต่างชนิดได้

คำสำคัญ: การเชื่อมความต้านทานแบบจุด เหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 อะลูมิเนียมผสม 5052 การก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ความต้านทานแรงดึงเหนือ

Abstract

This research investigates the influence of welding current levels and pulse configurations on the mechanical properties and intermetallic compound (IMC) formation behavior at the interface of resistance spot-welded (RSW) joints between SPFH780 low-alloy carbon steel 1.60 mm thick and 5052 aluminum alloy 1.50 mm thick. A comparative study was conducted using single-pulse and double-pulse current modes at intensities of 11000, 11500, 12000, and 12500 Amperes (A). The results demonstrate that double-pulse RSW yields significantly higher average tensile-shear strengths than single-pulse welding across all tested current levels. Notably, a peak average tensile shear strength of 4534.654 N was achieved at a current of 12500 A using the double-pulse mode. This improvement is attributed to the superior thermal cycle control and the reduction of excessive heat accumulation inherent in the double-pulse delivery, which effectively limits the growth of brittle Fe_2Al_5 and $FeAl_3$ IMC layers to an optimal thickness. Microstructural analysis via scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) further revealed that increasing the welding current directly enhances heat input, thereby expanding the weld nugget size and improving the mechanical load-bearing capacity of the joints. In conclusion, the double-pulse welding process serves as a highly effective technique for enhancing mechanical performance and regulating interfacial IMC formation in dissimilar metal joining.

Keywords: Resistance Spot Welding, SPFH780 Low-Alloy Carbon Steel, 5052 Aluminum Alloy, Intermetallic Compound, Tensile Shear Strength

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วโลกมุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดการใช้พลังงานและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือการลดน้ำหนักของโครงสร้างยานยนต์ (Lightweighting) [1–7] การนำวัสดุน้ำหนักเบาอย่างอะลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloys) มาใช้งานร่วมกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (Advanced High Strength Steel: AHSS) จึงกลายเป็นกลยุทธ์สำคัญในการผลิตตัวถังรถยนต์แบบหลายวัสดุ (Multi-material design) เพื่อให้ได้ทั้งความแข็งแรงและความประหยัดน้ำหนัก [1–6, 8] อย่างไรก็ตาม การเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar Joining) ระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าถือเป็นความท้าทายทางวิศวกรรมอย่างยิ่ง เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมากทั้งในด้านสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น จุดหลอมเหลวที่ต่างกันเกือบเท่าตัว และการมีความสามารถในการละลายเข้าด้วยกันที่จำกัดมาก [7, 9]

การเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) เป็นกระบวนการยึดต่อหลักที่นิยมใช้ในสายการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เนื่องจากมีประสิทธิภาพการผลิตสูง รวดเร็ว และสามารถควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติได้ดี [10, 11] แต่เมื่อนำมาใช้เชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกันระหว่างอะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้า ความร้อนที่เกิดขึ้นในระดับสูงมักกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการแพร่ที่รอยต่อและก่อให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound: IMC) เช่น เฟส Fe₂Al₅ และ FeAl₃ [9, 10] ซึ่งเป็นชั้นที่มีความเปราะและมีความแข็งแรงสูงมาก หากชั้น IMC มีความหนาเกินไป จะส่งผลให้ความแข็งแรงทางกลของรอยเชื่อมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และมักเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดรอยแตกร้าวที่นำไปสู่การแตกหักในลักษณะเปราะที่รอยต่อ (Interfacial Fracture) [8, 10]

การควบคุมความหนาและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชั้น IMC จึงเป็นปัจจัยวิกฤตในการปรับปรุงคุณภาพของรอยเชื่อม งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพารามิเตอร์การเชื่อม โดยเฉพาะกระแสไฟฟ้า (Welding Current) และเวลาในการเชื่อม (Welding Time) มีผลโดยตรงต่อการเติบโตของชั้น IMC [11, 12] การนำเทคนิคการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulse Current) มาใช้ เช่น การเปรียบเทียบระหว่างพัลส์เดี่ยว (Single Pulse) และพัลส์คู่ (Double-Pulse) อาจเป็นทางเลือกในการจัดการการกระจายความร้อนและลดการสะสมความร้อนส่วนเกินที่รอยต่อได้ดีกว่า ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมความหนาของ IMC และการเพิ่มความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมให้เหมาะสมกับการใช้งาน [12, 13]

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างวัสดุต่างชนิดประเภทอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าได้เน้นไปที่การควบคุมพารามิเตอร์เพื่อจำกัดการขยายตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความแข็งแรงทางกล โดย Cserépi และ Meilinger [11] ได้ทำการศึกษาและพบว่าพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อความหนาและชนิดของเฟสในชั้น IMC ซึ่งเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการแตกหักและค่าแรงดึงเฉือนของรอยต่อ ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบหลายพัลส์เริ่มได้รับความสนใจอย่างมาก เช่น งานวิจัยของ Li และคณะ [14] ที่ได้ทำการศึกษาการใช้กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ขับไล่ (Expulsion Pulse) ร่วมกับพัลส์ล็อก (Locking Pulse) ซึ่งเป็นแนวทางในการควบคุมปริมาณอะลูมิเนียมหลอมเหลวบริเวณรอยต่อ โดยพัลส์ขับไล่ทำหน้าที่ขจัดอะลูมิเนียมส่วนเกินออกจากบริเวณเชื่อมโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แรงและสั้น ขณะที่พัลส์ล็อกช่วยสร้างแนวเชื่อมที่มั่นคงระหว่างวัสดุโดยหลังจากขจัดอะลูมิเนียมส่วนเกินออกแล้ว จะจ่ายกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง เพื่อทำให้วัสดุหลัก เช่น เหล็กหลอมและเชื่อมติดกัน ส่งผลให้สามารถลดการสะสมของอะลูมิเนียมและยับยั้งการเกิด IMC ที่มีความเปราะได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ Chen และ Liu [15] ได้ศึกษาและแสดงให้เห็นว่าการใช้กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse) ร่วมกับการอุ่นร้อน (Preheating) สามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ยได้สูงถึง 2858.700 นิวตัน และช่วยเพิ่มความเสถียรของรอยเชื่อมได้ดีกว่าการใช้พัลส์เดี่ยว

นอกจากนี้ งานวิจัยของ Lara และคณะ [16] ได้นำเสนอการใช้แผ่นสแตนเลสเป็นชั้นแทรกกลาง (Interlayer) ในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียม เพื่อปรับเปลี่ยนปฏิกิริยาทางเคมีบริเวณรอยต่อ โดยชั้นแทรกดังกล่าวช่วยลดการสัมผัสโดยตรงระหว่าง Fe และ Al และควบคุมพฤติกรรมของการแพร่ของธาตุ ส่งผลให้การก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะ โดยเฉพาะเฟส FeAl_3 ที่มีความเปราะสูงลดลง ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาผลของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของรอยเชื่อม แต่ในพฤติกรรมที่แตกหักยังคงมีความซับซ้อน เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัยร่วมกัน เช่น การเกิดสารประกอบเชิงโลหะ ขนาดแนวเชื่อม และการกระจายความร้อน ส่งผลให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนและครอบคลุม แต่จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ายังมีช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap) ที่สำคัญ คือการขาดข้อมูลการศึกษาเชิงเปรียบเทียบโดยตรงระหว่างอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ที่มีต่อการเชื่อมต่อดังกล่าว เช่น เหล็กกล้า SPFH780 และอะลูมิเนียม 5052 โดยเฉพาะการวิเคราะห์เชิงปริมาณของความหนาและเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ (Fe_2Al_5 และ FeAl_3) ที่สอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนในเงื่อนไขของพัลส์ที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งหวังจะเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ชัดเจนสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ต่อไป

ดังนั้น จากช่องว่างขององค์ความรู้ดังกล่าว การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์อิทธิพลของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนและพฤติกรรมการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้า SPFH780 และอะลูมิเนียมผสม 5052 โดยทำการเปรียบเทียบผลของการใช้กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค การก่อตัวของชั้น IMC และสมบัติทางกล อันนำไปสู่การกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมโลหะพื้น

การเตรียมโลหะพื้นสำหรับศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอะลูมิเนียมผสม 5052 กับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 จะทำการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐานในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด AWS C1.1M/C1.1:2019 [17] โดยอะลูมิเนียมผสม 5052 ที่ใช้ในการศึกษานี้มีความหนา 1.50 mm และเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 มีความหนา 1.60 mm และชิ้นงานถูกเตรียมโดยการตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 25 mm และความยาว 102 mm โดยองค์ประกอบทางเคมีของโลหะพื้นแสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

2.2 วิธีการทดลอง

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาดัวแปรที่เป็นกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม โดยทำการศึกษาการปล่อยกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยวและแบบพัลส์คู่ที่เงื่อนไขในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 4 ค่า คือ 11000, 11500, 12000 และ 12500 แอมแปร์ (Ampere: A) ดังนั้นจึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 8 การทดลอง ซึ่งตัวแปรและระดับในการเชื่อมความต้านทานที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แสดงในตารางที่ 3

ในการศึกษานี้ ใช้ตัวแปรกระแสไฟฟ้าเป็นตัวแปรหลักในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิดความร้อนตามหลักจุล ซึ่งควบคุมการหลอมเหลวและการเจริญเติบโตของนิกเกิลบริเวณหลอมเหลว (Weld Nugget) ที่มีขนาด รูปร่าง และความต่อเนื่องเพียงพอส่งผลอย่างชัดเจนต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ทั้งนี้ในการศึกษานี้ได้กำหนดรูปแบบการปล่อยกระแสไฟฟ้าเป็นแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการสะสมและการกระจายความร้อน โดยเลือกช่วงค่ากระแสไฟฟ้าที่ 11000 A, 11500 A, 12000 A และ 12500 A ซึ่งครอบคลุมระดับพลังงานที่เหมาะสมต่อการเกิดรอยเชื่อมที่มีคุณภาพ และเอื้อต่อการวิเคราะห์อิทธิพลต่อความแข็งแรงเชิงกลและการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่ออย่างเป็นระบบ ดังนั้นการออกแบบการทดลองจำนวน 8 เงื่อนไขจึงมีความเหมาะสม

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวได้อย่างครอบคลุมและมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม 5052

ประเภทของวัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี (wt%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
อะลูมิเนียมผสม 5052	0.6	0.5	0.1	0.5	2.6	0.2	0.1	0.25	Bal.

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780

ประเภทของวัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี (wt%)					
	C	Si	Mn	P	S	Fe
เหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780	0.2	0.6	2	0.02	0.01	Bal.

ตารางที่ 3 ระดับและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ			
	1	2	3	4
กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยว (A)	11000	11500	12000	12500
กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ (A)	11000	11500	12000	12500

2.3 การเชื่อมความต้านทาน

ก่อนที่จะทำการเชื่อมความต้านทาน นำโลหะพื้นหรือชิ้นงานล้างทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงานด้วยอะซิโตนเพื่อขจัดคราบน้ำมันที่ผิวและรอให้แห้ง จากนั้นทำการวางและเตรียมชิ้นงานทดสอบประกอบกับตัวจับยึดชิ้นงานแล้วทำการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทาน PANASONIC รุ่น YR500-CM2 ขนาดกำลัง 50 KVA 50 Hz โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ที่มีลักษณะโค้งมนและตัดตรงบริเวณปลายอิเล็กโทรด โดยใช้อิเล็กโทรดทำจากวัสดุทองแดงผสม CuCrZr

2.4 การทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ

สำหรับขั้นตอนการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ จะนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด มาทำการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X 50 kN ที่ความเร็ว 2.0 mm/min

2.5 การวิเคราะห์ชิ้นสารประกอบบริเวณรอยต่อ

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ชิ้นสารประกอบบริเวณรอยต่อนั้น จะนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ มาทำการวิเคราะห์ชิ้นสารประกอบบริเวณรอยต่อ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ยี่ห้อ ThermoFisher รุ่น Axia ChemiSEM และวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุบริเวณรอยต่อของชิ้นงานด้วย Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) รุ่น Axia ChemiSEM

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุด

หลังจากการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดของชิ้นงาน ได้นำชิ้นงานมาทำการทดสอบความแข็งแรงบริเวณรอยต่อ โดยการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อและนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์โดยนำชิ้นงานมาทำ

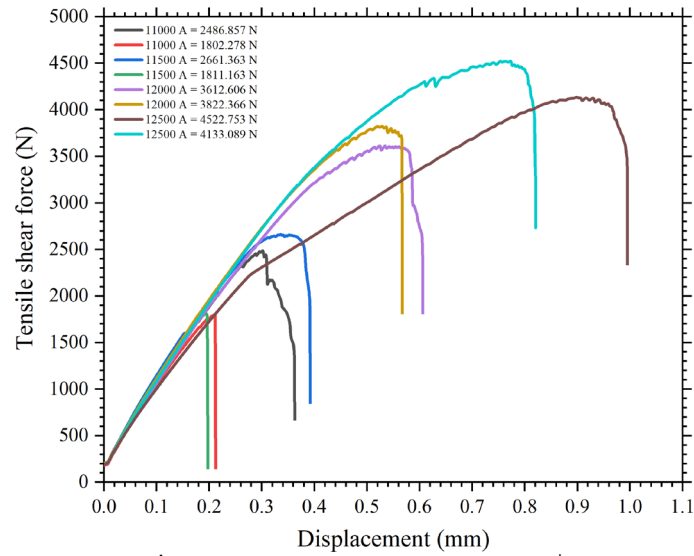
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน โดยผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเดือนแสดงดังตารางที่ 4

จากการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเดือน พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงเดือนเฉลี่ยสูงสุดของพัลส์เดี่ยวอยู่ที่ 4327.921 N ที่กระแสไฟฟ้า 12500 A และสำหรับพัลส์คู่ ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 4534.654 N ที่กระแสไฟฟ้า 12500 A โดยรวมแล้วการเชื่อมความต้านทานแบบพัลส์คู่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนที่สูงกว่าการเชื่อมแบบพัลส์เดี่ยวที่กระแสไฟฟ้าที่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 1–3 ดังนั้นการใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse) มีแนวโน้มที่จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนเฉลี่ยที่สูงกว่าแบบพัลส์เดี่ยว (Single Pulse) อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่กระแสไฟฟ้า 12500 A

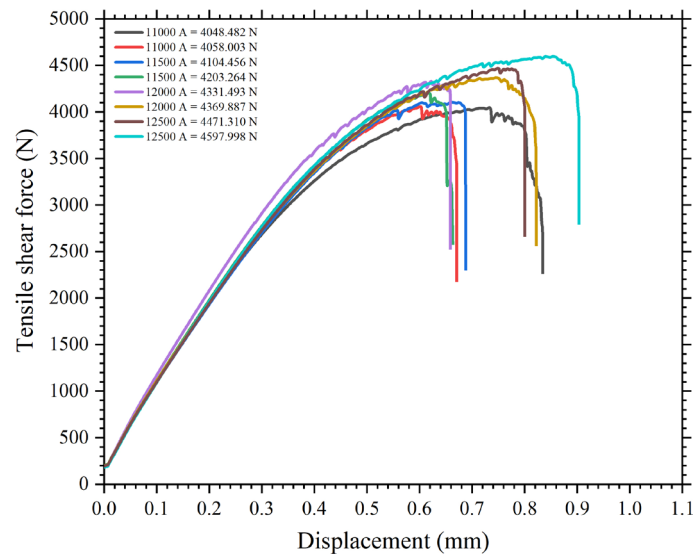
จากการวิเคราะห์อิทธิพลของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFH780 และอะลูมิเนียมผสม 5052 พบว่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse) ส่งผลให้ค่าแรงดึงเดือนสูงกว่าแบบพัลส์เดี่ยว เนื่องจากกลไกการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ช่วยควบคุมวัฏจักรความร้อนและลดการสะสมความร้อนส่วนเกินบริเวณรอยต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สามารถจำกัดการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ เช่น เฟส Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ [14, 18] ที่มีความเปราะสูงให้มีความหนาที่เหมาะสม ในขณะที่การเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มพลังงานความร้อนตามกฎของจูลซึ่งกระตุ้นให้เกิดการหลอมละลายและการเพิ่มขนาดของนิกเกิลเชื่อมทำให้พื้นที่ที่รับแรงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้รอยเชื่อมสามารถรองรับภาระเชิงกลได้ดีขึ้น และส่งผลให้รอยเชื่อมมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงเดือนเพิ่มขึ้นตามระดับกระแสไฟฟ้า โดยมีค่าสูงสุดที่ระดับกระแสไฟฟ้า 12500 A

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเดือน

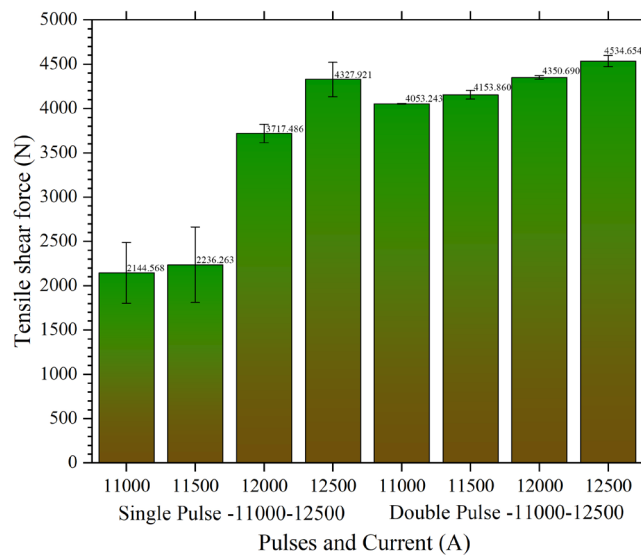
ตัวแปร	กระแส ไฟฟ้า (A)	ทำซ้ำครั้งที่ 1 (N)	ทำซ้ำครั้งที่ 2 (N)	ค่าเฉลี่ย (N)
กระแส ไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยว (A)	11000	2486.857	1802.278	2144.568
	11500	2661.363	1811.163	2236.263
	12000	3612.606	3822.366	3717.486
	12500	4522.753	4133.089	4327.921
กระแส ไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ (A)	11000	4048.482	4058.003	4053.243
	11500	4104.456	4203.264	4153.860
	12000	4331.493	4369.887	4350.690
	12500	4471.310	4597.998	4534.654



รูปที่ 1 ความต้านทานแรงดึงเชื่อมแบบพัลส์เดี่ยว



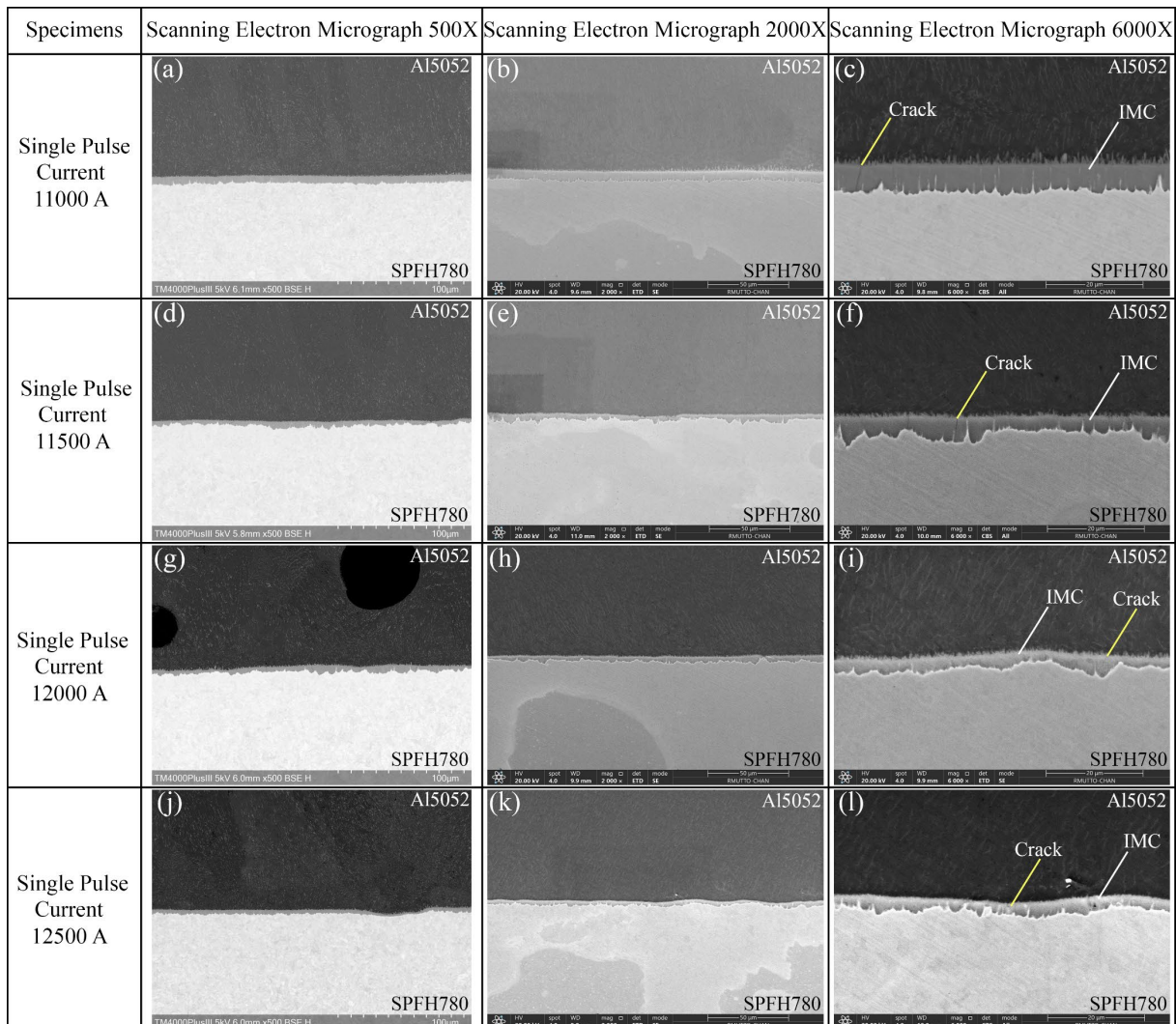
รูปที่ 2 ความต้านทานแรงดึงเชื่อมแบบพัลส์คู่



รูปที่ 3 ความต้านทานแรงดึงเชื่อมแบบพัลส์คู่และพัลส์เดี่ยว

3.2 โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบบริเวณรอยต่อ

จากการวิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบบริเวณรอยต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) บริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้า SPFH780 และอะลูมิเนียม 5052 ดังแสดงในรูปที่ 4 (a)–(l) พบว่าการใช้กระแสไฟฟ้าที่ 12500 A ส่งผลให้เกิดรอยแตกกว้างในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (IMC) น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับระดับกระแสไฟฟ้าอื่น ๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มพลังงานความร้อนในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดตามหลักของจูล (Joule Heating) ซึ่งจะช่วยให้เกิดการเปียกที่ผิว (Wetting) และช่วยในการแพร่ของอะตอมระหว่างวัสดุต่างชนิดให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งในสภาวะที่กระแสไฟฟ้าที่ต่ำ ทำให้พลังงานความร้อนที่ไม่เพียงพออาจทำให้ชั้นของ IMC เกิดการก่อตัวแบบไม่ต่อเนื่องหรือมีลักษณะที่มีความเปราะสูงจนไม่สามารถต้านทานความเค้นหดตัว (Thermal Contraction Stress) ในช่วงของการเย็นตัวได้ ทำให้เกิดรอยแตก (Micro-Cracks) หรือช่องว่างบริเวณรอยต่อ ในขณะที่กระแสไฟฟ้า 12500 A นั้น ช่วยให้ชั้น IMC มีความต่อเนื่องและมีการยึดเกาะทางกลที่ดีกว่ากระแสไฟฟ้าที่ต่ำ จึงช่วยลดการเกิดรอยแตกและส่งผลให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่สูงกว่าเงื่อนไขอื่นตามผลการทดลองสำหรับในการศึกษานี้



รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดพัลส์เดี่ยวที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่แตกต่างกัน (a–c): กระแสไฟฟ้า 11000 A (d–f): กระแสไฟฟ้า 11500 A (g–i): กระแสไฟฟ้า 12000 A และ (j–l): กระแสไฟฟ้า 12500 A

จากรูปที่ 5 (a)–(l) เป็นโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่แตกต่างกัน โดยกระแสไฟฟ้าพัลส์แรกที่ใช้ในการเชื่อมคือ 4000 A และกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีค่ากระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันคือ 11000 A, 11500 A, 12000 A และ 12500 A สำหรับในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแบบพัลส์คู่ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าพัลส์แรกทำหน้าที่เป็น "พัลส์กระตุ้นผิวหน้า" (Activation Pulse) โดยมีกลไกหลักคือการทำลายชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ Al_2O_3 บนผิวหน้าอะลูมิเนียมผสม 5052 ซึ่งชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ Al_2O_3 มีความหนาแน่นและมีจุดหลอมเหลวสูงมาก (ประมาณ 2050 °C) ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นกระแสไฟฟ้าพัลส์แรกที่ใช้ 4000 A ซึ่งเป็นระดับกระแสไฟฟ้าที่ไม่สูงจนทำให้เกิดการหลอมละลายได้อย่างรุนแรง จะสร้างความร้อนเฉพาะจุดที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งความร้อนนี้จะทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากการขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันระหว่างออกไซด์และเนื้อโลหะ ส่งผลให้ชั้นออกไซด์เกิดการแตกร้าวและหลุดลอกออกมา ทำให้เกิดผิวหน้าโลหะที่สะอาดและสัมผัสกันได้โดยตรง หรือพัลส์แรกช่วยลดความต้านทานสัมผัส (Contact Resistance) ให้คงที่และสม่ำเสมอ พร้อมทั้งเพิ่มพื้นที่สัมผัสที่สะอาดระหว่างโลหะต่างชนิดกันได้

ในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อม ความต้านทานสัมผัส (Contact Resistance) จะมีความผันผวนสูงมาก หากใช้กระแสไฟฟ้าสูงในทันทีแบบพัลส์เดียวจะทำให้เกิดการอาร์ค การระเบิด หรือการกระเด็นของโลหะที่หลอมได้ ดังนั้นการใช้พัลส์แรกที่ใช้ 4000 A จะช่วยให้ค่อยๆ ลดความต้านทานสัมผัสให้ต่ำลงและสม่ำเสมอทั่วบริเวณรอยต่อ ซึ่งเป็นการเตรียมความพร้อมให้กับการไหลของกระแสไฟฟ้าในพัลส์ที่สองที่มีค่าสูงกว่า ทำให้การกำเนิดความร้อนในพัลส์หลักหรือพัลส์สองนั้นมีความเสถียรขึ้น และอีกประการหนึ่งการเปิดผิวหน้าขึ้นงานในพัลส์แรกจะช่วยให้โลหะหลอมจากฝั่งอะลูมิเนียมสามารถเปียกที่ผิว (Wetting) บนฝั่งเหล็กได้ดีขึ้น และช่วยกระตุ้นการแพร่ (Diffusion) ของอะตอมระหว่าง Fe และ Al ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อได้รับพลังงานจากพัลส์ที่สอง ส่งผลให้พันธะทางโลหะวิทยาแข็งแรงขึ้น จนได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่สูงที่สุดในเงื่อนไข 12500 A

นอกจากพัลส์แรกจะช่วยเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานให้สูงขึ้นระดับหนึ่งแล้ว จะส่งผลให้ความเหนียว (Ductility) ของวัสดุเพิ่มขึ้นด้วย และช่วยให้ผิวสัมผัสแนบสนิทกันได้ดีขึ้นภายใต้แรงกดของอิเล็กโทรด (Electrode Force) การที่ผิวสัมผัสแนบสนิทก่อนเริ่มพัลส์ที่สอง จะช่วยควบคุมการเติบโตของ ชั้นสารประกอบเชิงโลหะให้มีความสม่ำเสมอและลดโอกาสการเกิดรอยแตกร้าว (Cracks) ในชั้นของ IMC ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5 (a)–(l)

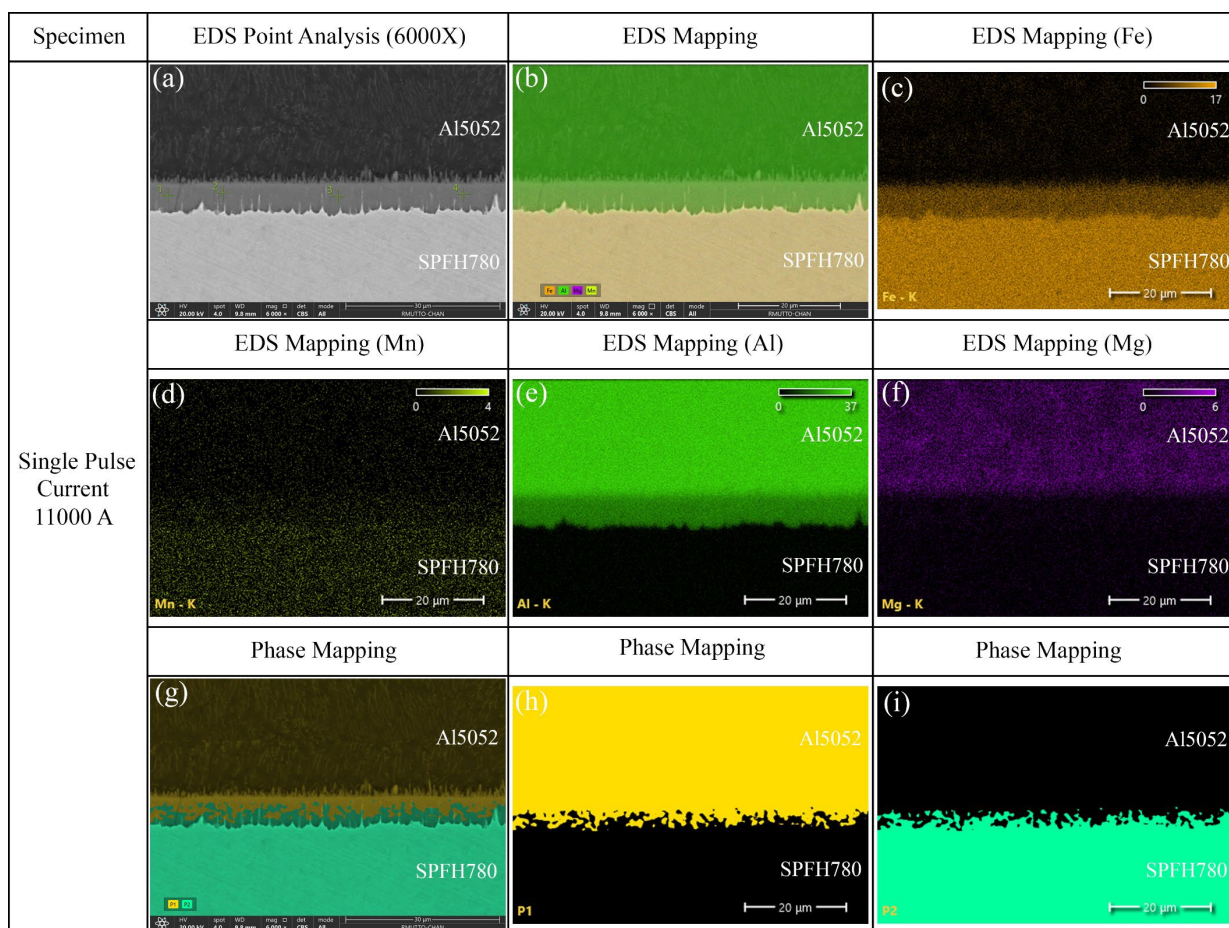
Specimens	Scanning Electron Micrograph 500X	Scanning Electron Micrograph 2000X	Scanning Electron Micrograph 6000X
Double Pulse Current 11000 A SPFH780	(a) Al5052 SPFH780 TM4000PlusIII 5kV 6.2mm x500 BSE-H 100µm	(b) Al5052 SPFH780 TM4000PlusIII 5kV 10.0mm x2000 BSE-H 50µm	(c) Al5052 IMC SPFH780 TM4000PlusIII 5kV 10.0mm x6000 BSE-H 20µm
Double Pulse Current 11500 A SPFH780	(d) Al5052 SPFH780 TM4000PlusIII 5kV 6.2mm x500 BSE-H 100µm	(e) Al5052 SPFH780 TM4000PlusIII 5kV 10.0mm x2000 BSE-H 50µm	(f) Al5052 IMC SPFH780 TM4000PlusIII 5kV 10.0mm x6000 BSE-H 20µm
Double Pulse Current 12000 A	(g) Al5052 SPFH780 TM4000PlusIII 5kV 6.3mm x500 BSE-H 100µm	(h) Al5052 SPFH780 TM4000PlusIII 5kV 10.0mm x2000 BSE-H 50µm	(i) Al5052 IMC SPFH780 TM4000PlusIII 5kV 10.0mm x6000 BSE-H 20µm
Double Pulse Current 12500 A	(j) Al5052 SPFH780 TM4000PlusIII 5kV 5.8mm x500 BSE-H 100µm	(k) Al5052 SPFH780 TM4000PlusIII 5kV 10.0mm x2000 BSE-H 50µm	(l) Al5052 IMC SPFH780 TM4000PlusIII 5kV 10.0mm x6000 BSE-H 20µm

รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่แตกต่างกัน (a-c): กระแสไฟฟ้า 11000 A (d-f): กระแสไฟฟ้า 11500 A (g-i): กระแสไฟฟ้า 12000 A และ (j-l): กระแสไฟฟ้า 12500

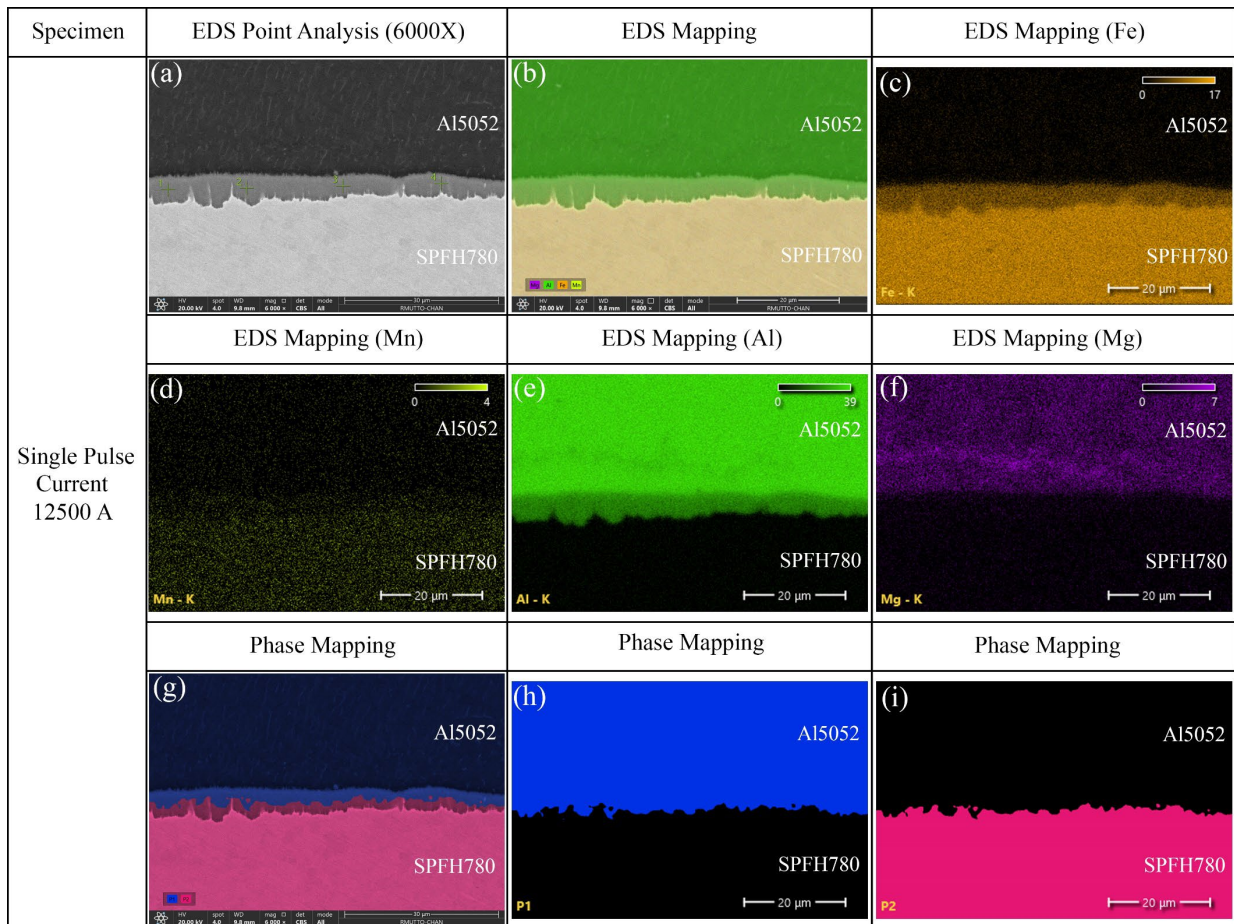
A

3.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่ชั้นสารประกอบบริเวณรอยต่อ

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบขององค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่รอยต่อดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 6-7 (a-l) พบว่าการใช้กระแสไฟฟ้า 11000 A และ 12500 A แบบพัลส์เดี่ยวให้ผลลัพธ์ที่ต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่กระแสไฟฟ้า 11000 A พบการก่อตัวของรอยแตกกว้างและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อที่ไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่กระแสไฟฟ้า 12500 A ให้ผลการเชื่อมที่ดีกว่าและแข็งแรงกว่า โดยมีชั้นสารประกอบเชิงโลหะชนิด $FeAl_2$ ก่อตัวอย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งของเฟสที่ระบุในแผนภาพสมดุลเฟสของโลหะผสมสองชนิด (Binary Alloy Phase Diagram) ของ FeAl [19] และสอดคล้องกับการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) ที่แสดงการกระจายตัวของธาตุ Fe และ Al อย่างเข้มข้นและสม่ำเสมอในบริเวณรอยเชื่อม ส่วนธาตุ Mn และ Mg ยังคงมีการกระจายตัวที่เบาบางและไม่ได้เป็นองค์ประกอบหลักของชั้นเฟสที่เกิดขึ้นในทั้งสองสภาวะ นอกจากนี้ จากรูปการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (EDS Mapping) ยังยืนยันว่าการกระจายตัวของธาตุ Al และ Fe เป็นองค์ประกอบหลักของเฟสดังกล่าว ในขณะที่ปริมาณของ Mn และ Mg ที่ค่อนข้างบางเล็กน้อยนั้นไม่ได้มีบทบาทสำคัญในการสร้างโครงสร้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่บริเวณรอยต่อ



รูปที่ 6 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (EDS Mapping) และการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (a): ตำแหน่งการวิเคราะห์แบบจุด (b): รวมธาตุด้วยวิธี EDS Mapping (c): Fe (d): Mn (e): Al (f): Mg (g): การรวมการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (h): เฟส Al (i): เฟส Fe

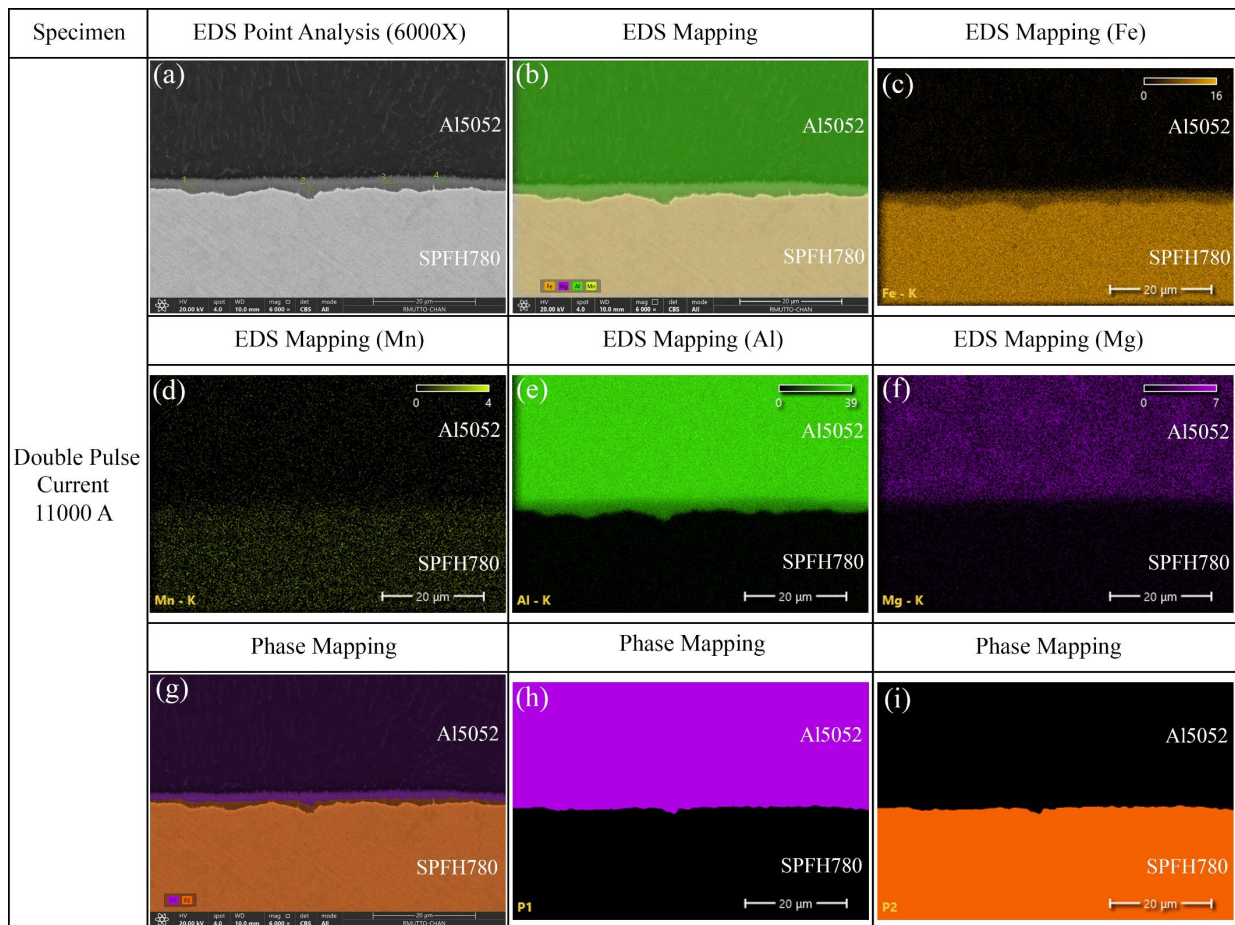


รูปที่ 7 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (EDS Mapping) และการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (a): ตำแหน่งการวิเคราะห์แบบจุด (b): รวมธาตุด้วยวิธี EDS Mapping (c): Fe (d): Mn (e): Al (f): Mg (g): การรวมการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (h): เฟส Al (i): เฟส Fe

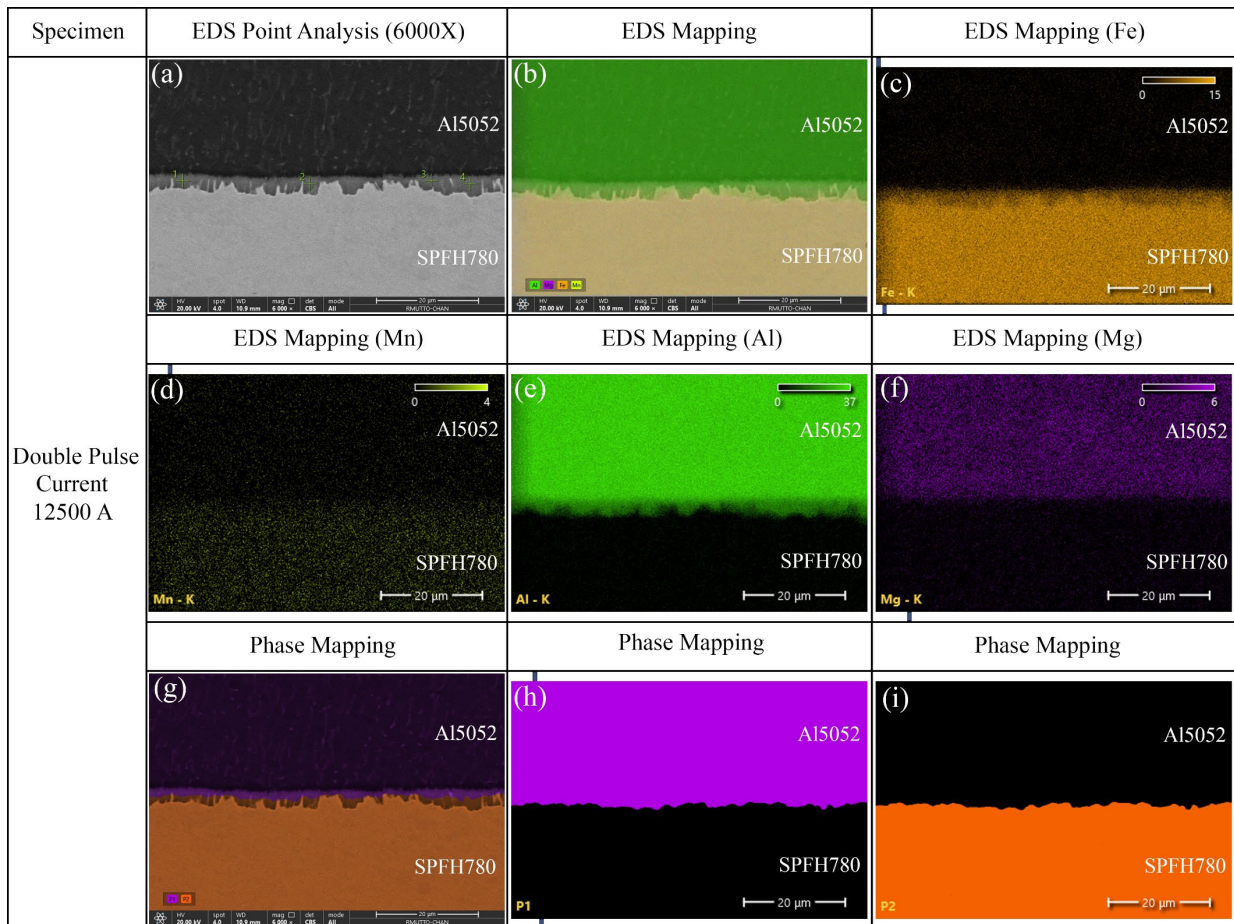
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ (Double Pulse Current) โดยใช้กระแสไฟฟ้า 11000 และ 12500 A ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 8-9 (a-l) พบว่าชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่ก่อตัวขึ้นที่กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมที่ 11000 A คือ FeAl_2 ในขณะที่กระแสไฟฟ้า 12500 A พบการก่อตัวของ Fe_2Al_5 ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งของเฟสที่ระบุในแผนภาพสมดุลเฟสของโลหะผสมสองชนิด ของ Fe-Al โดยกระบวนการเชื่อมแบบพัลส์คู่ไม่ปรากฏรอยแตกร้าวในทั้งสองสภาวะของการปล่อยกระแสไฟฟ้า และส่งผลให้ได้รอยต่อที่มีค่าความต้านทานแรงดึงเดือนสูงกว่าการเชื่อมแบบพัลส์เดี่ยว สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุ (EDS Mapping) และการระบุเฟส (Phase Mapping) ที่แสดงการกระจายตัวของธาตุ Fe และ Al อย่างเข้มข้นและสม่ำเสมอตลอดแนวรอยเชื่อม ในขณะที่ธาตุ Mn และ Mg ยังคงมีการกระจายตัวที่เบาบางและไม่ได้เป็นองค์ประกอบหลักของชิ้นเฟสที่เกิดขึ้นในทั้งสองสภาวะ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์เชิงกลระหว่างรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าและพฤติกรรมการก่อตัวของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ จากข้อมูลในตารางที่ 5 พบว่ารูปแบบกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่มีประสิทธิภาพในการจัดการวัฏจักรความร้อน (Thermal cycle management) ที่ดีกว่ารูปแบบพัลส์เดี่ยว โดยกลไกของพัลส์คู่ช่วยควบคุมการสะสมความร้อนส่วนเกินบริเวณรอยต่อ ส่งผลให้การแพร่ของอะตอมระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมมีความสม่ำเสมอมากขึ้น การควบคุมความร้อนด้วยวิธีนี้ช่วยจำกัดการเติบโตของเฟสที่เปราะบาง เช่น Fe_2Al_5 และ FeAl_3 ให้อยู่ในระดับความหนาที่เหมาะสมและมีความต่อเนื่อง

ของชิ้นสารประกอบ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดโอกาสการเกิดรอยแตกร้าวภายในรอยเชื่อม และส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มความต้านทานแรงดึงเฉือนให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบพัลส์เดี่ยวที่ระดับกระแสไฟฟ้าเดียวกัน



รูปที่ 8 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (EDS Mapping) และการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (a): ตำแหน่งการวิเคราะห์แบบจุด (b): รวมธาตุด้วยวิธี EDS Mapping (c): Fe (d): Mn (e): Al (f): Mg (g): การรวมการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (h): เฟส Al (i): เฟส Fe



รูปที่ 9 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (EDS Mapping) และการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (a): ตำแหน่งการวิเคราะห์แบบจุด (b): รวมธาตุด้วยวิธี EDS Mapping (c): Fe (d): Mn (e): Al (f): Mg (g): การรวมการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (h): เฟส Al (i): เฟส Fe

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่บริเวณรอยต่อ

องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้า 11000 A ชนิดพัลส์เดียว (รูปที่ 6(a))				
ชนิดของธาตุ	จุดที่ 1 at%	จุดที่ 2 at%	จุดที่ 3 at%	จุดที่ 4 at%
Al	65.05	65.35	65.05	64.6
Fe	34.95	34.25	34.95	35.00
Mn	–	0.40	–	0.40
Mg	–	–	–	–
Possible Phase	FeAl ₂	FeAl ₂	FeAl ₂	FeAl ₂

ตารางที่ 5 (ต่อ) องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่บริเวณรอยต่อ

องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้า 12500 A ชนิดพัลส์ เดี่ยว (รูปที่ 7(a))				
ชนิดของธาตุ	จุดที่ 1 at%	จุดที่ 2 at%	จุดที่ 3 at%	จุดที่ 4 at%
Al	68.65	65.40	64.60	65.20
Fe	29.35	34.60	35.00	34.80
Mn	0.40	–	0.40	–
Mg	1.60	–	–	–
Possible Phase	Fe ₂ Al ₅	FeAl ₂	FeAl ₂	FeAl ₂
องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้า 11000 A ชนิดพัลส์คู่ (รูปที่ 8(a))				
Al	68.95	66.25	66.20	68.20
Fe	28.95	33.35	33.80	31.50
Mn	0.40	0.40	–	0.30
Mg	1.70	–	–	–
Possible Phase	Fe ₂ Al ₅	FeAl ₂	FeAl ₂	FeAl ₂
องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้า 12500 A ชนิดพัลส์คู่ (รูปที่ 9(a))				
Al	68.80	67.30	66.85	70.95
Fe	29.10	32.30	32.75	28.45
Mn	0.40	0.40	0.40	0.30
Mg	1.70	–	–	0.30
Possible Phase	Fe ₂ Al ₅	FeAl ₂	FeAl ₂	FeAl ₃

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ และค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้า SPFH780 และอะลูมิเนียมผสมเกรด 5052 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ในเชิงที่สวนทางกัน ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการหาค่าที่ตัวแปรหรือเงื่อนไขเหมาะสมที่สุด (Optimization) ในเชิงโลหะวิทยา ชั้น IMC ที่ก่อตัวขึ้นประกอบด้วยเฟส Fe₂Al₅ และ FeAl₃ ซึ่งมีคุณสมบัติความแข็งแรงสูงแต่มีความเปราะเด่นชัด

จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมความแข็งแรงด้วยค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนพบว่า เมื่อปรับเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมจาก 11000 A เป็น 12500 A พลังงานความร้อนสะสม ณ บริเวณรอยต่อจะเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลต่อกลไกความแข็งแรงในสองลักษณะที่สวนทางกัน กล่าวคือ: (1) การขยายตัวของนูกเก็ต (Nugget Size Expansion): ช่วยเพิ่มพื้นที่หน้าตัดในการประสาน (Bonding Area) ซึ่งส่งผลบวกโดยตรงต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม (2) การเพิ่มขึ้นของความหนาชั้น IMC: หากชิ้นสารประกอบมีความหนาเกินกว่าระดับวิกฤต (Critical Thickness) ซึ่งโดยทั่วไปกำหนดไว้ที่ไม่เกิน 10 ไมโครเมตร สำหรับรอยต่อเหล็กกับอะลูมิเนียม [18, 20, 21] จะส่งผลให้ชิ้นสารประกอบนี้กลายเป็นแหล่งกำเนิดรอยร้าว (Crack Initiation Site) และลดความเหนียว (Ductility) ของรอยเชื่อมลง

ประเด็นสำคัญที่พบจากการศึกษานี้พบว่า การประยุกต์ใช้เทคนิคการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ที่ระดับ 12500 A ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 4534.654 นิวตัน เนื่องจากช่วงพัก (Cooling Time) ระหว่างพัลส์ช่วยชะลอ

อัตราการแพร่ของอะตอม (Atomic Diffusion) ระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) และอะลูมิเนียม (Al) ให้ไม่รวดเร็วเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับกร่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยวที่ระดับพลังงานเทียบเท่ากัน ส่งผลให้ชั้น IMC มีความหนาในระดับที่เหมาะสม (Optimal Thickness) ซึ่งเพียงพอต่อการสร้างพันธะทางเคมีที่แข็งแรงโดยไม่ก่อให้เกิดการแตกหักแบบเปราะที่รอยต่อ (Interfacial Brittle Failure)

สำหรับในด้านของการควบคุมคุณภาพสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ องค์ความรู้นี้ชี้ให้เห็นว่าการจัดการวัฏจักรความร้อนสำหรับงานเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Thermal Cycle Management) ผ่านเทคนิคการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ เป็นปัจจัยวิกฤตที่ต้องควบคุมควบคู่ไปกับการตรวจสอบขนาดของนิกเกิ้ล ดังนั้นข้อมูลเชิงลึกนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการกำหนดพารามิเตอร์เพื่อควบคุมมาตรฐานการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับโลหะต่างชนิดให้มีประสิทธิภาพและมีความเชื่อมั่นสูงสุดในเชิงวิศวกรรมต่อไป

4. สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อสมบัติทางกลและพฤติกรรมการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 และอะลูมิเนียมผสมเกรด 5052 โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 11000 A, 11500 A, 12000 A และ 12500 A โดยวิธีการทดลองประกอบด้วยการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน AWS C1.1M/C1.1:2019 และการทดสอบความต้านทานแรงดึงเฉือนด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Universal Testing Machine: UTM) สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจะทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (EDS) บริเวณรอยต่อ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงกว่าการใช้พัลส์เดี่ยวในทุกระดับกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม โดยเฉพาะที่ระดับกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 12500 A ซึ่งให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดที่ 4534.654 N เนื่องจากการควบคุมวัฏจักรความร้อนด้วยพัลส์คู่ช่วยจำกัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะชนิด Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและลดความเปราะบริเวณรอยต่อ นอกจากนี้การเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้ายังส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขนาดนิกเกิ้ลเชื่อม ซึ่งช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการรองรับภาระทางกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ สรุปได้ว่าเทคนิคการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่เป็นแนวทางที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพการยึดติดระหว่างโลหะต่างชนิดเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ต้องการความแข็งแรงสูงและมีน้ำหนักเบา

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตบูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Walker, N. Avedissian, C. Vanderbilt, D. Paolini, and W. Zhang, "Effect of Fe–Al Intermetallics on Fatigue Properties of Aluminum to Steel Dissimilar Spot Welds," *International Journal of Fatigue*, vol. 187, p. 108434, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108434.
- [2] F. Teng, P. Huan, X. Wang, Z. Jiang, Q. Zhang, R. Liu, D. Lv, and H. Di, "Improving the Mechanical Properties of an Al–Si–Coated 22MnB5 Steel Resistance Spot Welding Joint by Adding Ni Foil to Suppress Fe–Al IMCs and δ -Ferrite," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 37, pp.

3615–3624, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.07.058.

- [3] A. Kapil, A. Vivek, and G. Daehn, “Role of Zinc Coating on Joint Properties in Impact Spot Welded Al 6111 Aluminum Alloy to Galvanized High–Strength Low–Alloy Steel,” *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 11, p. 100276, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.jajp.2024.100276.
- [4] W. Peng, D. Du, A. Dong, G. Wu, Z. Shen, B. Sun, N. Chen, H. Teng, S. Wang, and Y. Xie, “Mechanism of Flash Nickel Interlayer in Mitigating LME in Resistance Spot Welding of High–Strength Steel with Zn–Al–Mg Coating,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 40, pp. 1248–1264, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.12.246.
- [5] Z. Li, Y. Wang, Y. Chen, F. Cheng, D. Yang, G. Xie, and H. Yi, “Critical Influence of FeAl and α -Fe Phases in Coating Layers on Resistance Spot Weldability of Al–Si Coated Press–Hardening Steels,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 41, pp. 4015–4030, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.jmrt.2026.02.054.
- [6] S. Wang, Z. Yuan, Y. Meng, and B. Ge, “Failure Mechanisms of Intermetallic Compounds in Aluminum–Steel Resistance Spot Welds Utilizing Advanced Electron Microscopy Techniques,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 35, pp. 5216–5221, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.02.178.
- [7] L. Shi, J. Kang, X. Chen, A. S. Haselhuhn, D. R. Sigler, and B. E. Carlson, “Determination of Fracture Modes in Novel Aluminum–Steel Dissimilar Resistance Spot Welds,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 17, pp. 355–362, 2019, doi: 10.1016/j.prostr.2019.08.047.
- [8] Y. G. Kim, B. J. Jo, J. S. Kim, and I. J. Kim, “A Study on Dissimilar Welding of Aluminum Alloy and Advanced High Strength Steel by Spot Welding Process,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 18, no. 1, pp. 121–126, Jan. 2017, doi: 10.1007/s12541-017-0015-6.
- [9] C. Qian, H. Ghassemi–Armaki, L. Shi, J. Kang, A. S. Haselhuhn, and B. E. Carlson, “Competing Fracture Modes in Al–Steel Resistance Spot Welded Structures: Experimental Evaluation and Numerical Prediction,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 185, p. 104838, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104838.
- [10] Y. Che, L. Wang, D. Sun, H. Li, and W. Geng, “Microstructures and Mechanical Properties of Resistance Spot–Welded Steel/Aluminum Alloy Joints with Process Tapes,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 27, no. 11, pp. 5532–5544, Nov. 2018, doi: 10.1007/s11665-018-3595-0.
- [11] M. Fodorné Cserépi and Á. Meilinger, “The Effect of RSW Technological Parameters to the Properties of Aluminium/Steel Hybrid Joints,” *Multidiszciplináris Tudományok*, vol. 14, no. 3, pp. 202–210, 2024, doi: 10.35925/j.multi.2024.3.18.
- [12] W. Cai, Q. Chen, Y. Wang, S. Dong, and P. Luo, “Microstructural and Mechanical Characterization of Steel–DP780/Al–5052 Joints Formed Using Resistance Element Welding with Concealed Rivet Cover,” *Composites and Advanced Materials*, vol. 31, 2022, doi: 10.1177/26349833221101076.

- [13] S. M. Hong, S. Tashiro, H. S. Bang, and M. Tanaka, “A Study on the Effect of Current Waveform on Intermetallics Formation and the Weldability of Dissimilar Materials Welded Joints (AA5052 Alloy—GI Steel) in AC Pulse GMAW,” *Metals*, vol. 11, no. 4, p. 561, Apr. 2021, doi: 10.3390/met11040561.
- [14] M. Li, Y. Wang, W. Tao, and S. Yang, “A Novel Strategy for Realizing Reliable Welding of Aluminum–Steel,” *Welding Journal*, vol. 102, no. 11, pp. 293s–312s, Nov. 2023, doi: 10.29391/2023.102.022.
- [15] L. Chen and J. Liu, “Optimisation and Study of a Welding Process for Aluminium and Galvanised Steel Based on Resistance Welding,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 238, no. 13, 2024, doi: 10.1177/09544062241226792.
- [16] B. Lara, R. Giorjao, H. Ghassemi–Armaki, and A. Ramirez, “Fe–Al Intermetallic Suppression of Dissimilar RSW Joints Using Stainless–Steel Interlayers,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 28, no. 6, pp. 461–467, 2023, doi: 10.1080/13621718.2023.2176046.
- [17] C1.1M/C1.1:2019, “Recommended Practices for Resistance Welding,” (2019).
- [18] M. Fodorné Cserépi and Á. Meilinger, “Effect of Intermetallic Compound Layer Size on Al/Steel Spot Weld Properties,” *Pollack Periodica*, vol. 21, no. 1, 2026, doi: 10.1556/606.2026.01507.
- [19] H. Okamoto, P. R. Subramanian, L. Kacpzak, and T. B. Massalski, *Binary Alloy Phase Diagram Fe–Al*, Materials Park, OH, USA: ASM International, 2001.
- [20] R. Hatano, T. Ogura, T. Matsuda, T. Sano, and A. Hirose, “Relationship Between Intermetallic Compound Layer Thickness with Deviation and Interfacial Strength for Dissimilar Joints of Aluminum Alloy and Stainless Steel,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 735, pp. 361–366, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.08.065.
- [21] N. Chen, M. Wang, H. P. Wang, Z. Wan, and B. E. Carlson, “Microstructural and Mechanical Evolution of Al/Steel Interface with Fe_2Al_5 Growth in Resistance Spot Welding of Aluminum to Steel,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 34, pp. 424–434, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.06.024.

การประยุกต์สื่อนำงานและวิศวกรรมกระบวนการเพื่อเพิ่มผลิตภาพระบบจัดการหนังสือรับรองมาตรฐานฝีมือแรงงาน: กรณีศึกษาศูนย์ทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติแห่งหนึ่ง

Application of Lean Office and Process Engineering to Improve the Productivity of a Labor Skills Certificate Management System: A Case Study of a National Labor Skills Testing Center

บุญกิจ อุณพิกุล¹ และ เบญจมาศ ทินบุตร²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

²สำนักงานวิทยาเขตขอนแก่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

Boonkit Unpikul¹ and Benjamas Dhinnabutra²

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan
Khonkaen Campus, Muang Khon Kaen District, Khon Kaen 40000

²Khon Kaen Campus Office, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus Muang Khon
Kaen District, Khon Kaen 40000

*Corresponding author E-mail: benjamas.ti@rmuti.ac.th

(Received: April 17, 2026; Revise: June 22, 2026; Accepted: June 29, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการจัดการหนังสือรับรองผู้ผ่านการทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติของศูนย์ทดสอบกรณีศึกษา โดยประยุกต์ใช้สื่อนำงาน วิศวกรรมกระบวนการ และระบบช่วยงานด้วยปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับ Google Workspace การวิจัยใช้รูปแบบกรณีศึกษาก่อนและหลังการปรับปรุง (Before-and-After Case Study) วิเคราะห์กระบวนการด้วย VSM และ ECRS วัดเวลาการทำงานจากเอกสารชุดเดียวกันจำนวน 30 รอบ และตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของข้อมูลก่อนปรับปรุง 95 ฉบับและหลังปรับปรุง 30 ฉบับ ตัวชี้วัดหลักประกอบด้วย Lead Time, PCE, Retrieval Time และ Error Rate กระบวนการเดิมมี 6 ขั้นตอน เวลาคาดเฉลี่ย 4.00 ± 0.30 นาทีต่อฉบับ และ PCE ร้อยละ 37.5 หลังปรับปรุงเป็นกระบวนการ 5 ขั้นตอน โดยใช้ Apps Script สร้าง Hyperlink และจัดเก็บไฟล์ PDF ใน Google Drive ภายใต้การตรวจสอบของเจ้าหน้าที่ เวลาคาดลดลงเป็น 1.60 ± 0.06 นาทีต่อฉบับ ($t = 43.9, p < 0.001$) Retrieval Time ลดลงจาก 22.5 ± 4.5 นาทีเป็น 0.4 ± 0.1 นาที ($t = 26.9, p < 0.001$) และ PCE เพิ่มขึ้นร้อยละ 95.6 สำหรับ Error Rate ไม่พบข้อผิดพลาดในกลุ่มตัวอย่างหลังปรับปรุง แต่ผล Fisher's Exact Test มีค่า $p = 0.062$ จึงรายงานเป็นแนวโน้มการลดลง ไม่ใช่ผลที่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์พบว่าประหยัดต้นทุนเวลาได้ประมาณ 7,981 บาทต่อปี และคืนทุนภายในประมาณ 4 เดือน ผลการศึกษาชี้ว่ากระบวนการดิจิทัลต้นทุนต่ำสามารถลดเวลาค้นหาและลดงานซ้ำซ้อนในหน่วยงานที่มีการจัดการเอกสารรับรองมาตรฐานได้

คำสำคัญ: สื่อนำงาน วิศวกรรมกระบวนการ ปัญญาประดิษฐ์ การจัดการหนังสือรับรอง Google Workspace

Abstract

This study aims to improve the labor skills certificate management process in a case-study testing center by integrating Lean Office, process engineering, and an AI-Assisted Workflow with Google Workspace. A before-and-after case study was conducted using value stream mapping and ECRS. Time measurements were collected from the same set of 30 certificates, whereas data-error checks covered 95 certificates before improvement and 30 certificates after improvement. The main indicators were lead time, process cycle efficiency, retrieval time, and error rate. The original 6-step process required 4.00 ± 0.30 min/certificate and yielded a PCE of 37.5%. The improved 5-step process used Google Apps Script to create hyperlinks to PDF files stored in Google Drive, with staff verification retained. Lead time decreased to 1.60 ± 0.06 min/certificate ($t = 43.9$, $p < 0.001$), retrieval time decreased from 22.5 ± 4.5 min to 0.4 ± 0.1 min ($t = 26.9$, $p < 0.001$), and PCE increased to 95.6%. No data error was observed in the post-improvement sample; however, Fisher's Exact Test yielded $p = 0.062$, so the error-rate result is interpreted as a decreasing tendency rather than statistical significance at the 0.05 level. The economic analysis indicated an annual time-cost saving of approximately 7,981 THB and a payback period of about four months. The findings suggest that a low-cost digital workflow can reduce retrieval time and redundant clerical work in certificate-based document management.

Keywords: Lean Office, Process Engineering, Artificial Intelligence, Certificate Management, Google Workspace

1. บทนำ

การทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติเป็นกลไกสำคัญในการพัฒนากำลังคนตามพระราชบัญญัติส่งเสริมการพัฒนาฝีมือแรงงาน พ.ศ. 2545 [1] ศูนย์ทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติจึงมีภารกิจออกและจัดเก็บหนังสือรับรองแก่ผู้ผ่านการทดสอบในสาขาอาชีพและระดับต่าง ๆ หนังสือรับรองดังกล่าวเป็นหลักฐานสำคัญต่อผู้ผ่านการทดสอบ นายจ้าง และหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น กระบวนการจัดเก็บ ตรวจสอบ และสืบค้นเอกสารจึงต้องมีความถูกต้อง รวดเร็ว ตรวจสอบย้อนกลับได้ และลดความเสี่ยงจากเอกสารสูญหายหรือชำรุด

ในศูนย์ทดสอบกรณีศึกษา กระบวนการเดิมยังอาศัยเอกสารกระดาษและการป้อนข้อมูลด้วยมือเป็นหลัก เมื่อออกหนังสือรับรองแล้ว เจ้าหน้าที่ต้องถ่ายสำเนา จัดเก็บใส่แฟ้ม แยกตามสาขาและระดับ และบันทึกทะเบียนคุมที่ละรายการ กระบวนการ 6 ขั้นตอนนี้ใช้เวลาเฉลี่ย 4.00 นาทีต่อฉบับ โดยมีความสูญเสียที่วัดได้รวม 2.00 นาทีต่อฉบับ ได้แก่ การถ่ายสำเนา การจัดเก็บแฟ้มกายภาพ และการป้อนทะเบียนคุมซ้ำซ้อน นอกจากนี้ การสืบค้นย้อนหลังใช้เวลาประมาณ 15–30 นาทีต่อครั้ง และพบข้อมูลคลาดเคลื่อนในระบบเดิมร้อยละ 4.2 (4 จาก 95 ฉบับ) ขอบเขตของกรณีศึกษานี้จึงจำกัดอยู่ที่เอกสารหนังสือรับรองมาตรฐานฝีมือแรงงานของศูนย์ทดสอบแห่งหนึ่ง ปริมาณงานประมาณ 200 ฉบับต่อปี และการสืบค้นประมาณ 200 ครั้งต่อปี

ผลกระทบของกระบวนการดังกล่าวปรากฏชัดในระยะยาว เมื่อจำนวนหนังสือรับรองสะสมมากขึ้น การสืบค้นหนังสือรับรองย้อนหลังต้องใช้เวลา 15–30 นาทีต่อครั้ง เนื่องจากต้องเปิดแฟ้มกระดาษทีละแฟ้ม ความเสี่ยงต่อการสูญหายหรือเสียหายของเอกสารต้นฉบับมีสูง โดยเฉพาะจากความชื้น แมลง หรือเพลิงไหม้ นอกจากนี้ การป้อนข้อมูลด้วยมือซ้ำหลาย

ครั้งยังก่อให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูล (Error Rate) ที่วัดได้ร้อยละ 4.2 (4 จาก 95 ฉบับ) ซึ่งอาจส่งผลให้ผู้ผ่านการทดสอบไม่สามารถยืนยันสิทธิ์ได้เมื่อจำเป็น

จากการทบทวนวรรณกรรม พบช่องว่างของงานวิจัย 3 ประเด็น ประเด็นแรกคือช่องว่างด้านบริบท งานวิจัยด้านสินสำนักงานและระบบเอกสารดิจิทัลในหน่วยงานบริการภาครัฐยังมีหลักฐานเชิงประจักษ์จำกัดในบริบทศูนย์ทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงาน ประเด็นที่สองคือช่องว่างด้านวิธีการ งานที่เกี่ยวข้องจำนวนมากรายงานผลการลดขั้นตอนหรือเวลารวม แต่ยังไม่แยกนิยาม Lead Time, Touch Time, Waiting Time, AI Processing Time และ Retrieval Time อย่างชัดเจน ประเด็นที่สามคือช่องว่างด้านเทคโนโลยี งานเดิมมักใช้มนุษย์เป็นผู้ดำเนินการหลัก ขณะที่การใช้ AI-Assisted Workflow ร่วมกับ Google Workspace เพื่อจัดการการไหลของข้อมูลและสร้างจุดเชื่อมโยงเอกสารอัตโนมัติยังมีรายงานไม่มากในบริบทไทย [2–3], [7–8]

งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้แนวคิดสินสำนักงาน การวิเคราะห์สายธารคุณค่า (VSM) หลักการ ECRS และ Google Workspace ร่วมกับ Claude Cowork เพื่อพัฒนากระบวนการจัดการหนังสือรับรองในศูนย์ทดสอบกรณีศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์การวิจัย 3 ประการ คือ (1) วิเคราะห์ความสูญเสียและสาเหตุของกระบวนการเดิม (2) ออกแบบกระบวนการใหม่ด้วย ECRS และระบบดิจิทัล/AI-Assisted Workflow และ (3) ประเมินผลก่อนและหลังปรับปรุงด้วยตัวชี้วัดด้านเวลา ประสิทธิภาพรอบกระบวนการ ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล เวลาในการสืบค้น และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ผลที่ได้มุ่งเสนอแนวทางประยุกต์ใช้สำหรับหน่วยงานที่มีการจัดการเอกสารรับรองมาตรฐานหรือเอกสารเชิงหลักฐานที่ต้องสืบค้นย้อนหลังได้อย่างน่าเชื่อถือ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สินสำนักงาน (Lean Office) และการวิเคราะห์สายธารคุณค่า

Rother and Shook [9] ได้พัฒนาเครื่องมือการวิเคราะห์สายธารคุณค่า (Value Stream Mapping: VSM) เพื่อใช้ในการแสดงภาพรวมของกระบวนการทั้งหมด โดยจำแนกกิจกรรมที่เพิ่มคุณค่า (Value-Added: VA) ออกจากกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า (Non-Value-Added: NVA) ตัวชี้วัดหลักในการประเมินคือประสิทธิภาพรอบกระบวนการ (Process Cycle Efficiency: PCE) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (1) ทั้งนี้ Womack and Jones [2] รายงานว่ากระบวนการสำนักงานทั่วไปมักมีค่า PCE ต่ำกว่าร้อยละ 40 เนื่องจากมีสัดส่วนเวลาของกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า (NVA Time) สูง โดยสมการการคำนวณมีดังนี้

$$PCE = (VA \text{ Time} / \text{Total Lead Time}) \times 100 \quad (1)$$

2.2 หลักการ ECRS และวิศวกรรมกระบวนการ

Barnes [10] ได้กำหนดหลักการ ECRS เพื่อเป็นกรอบสำหรับการปรับปรุงวิธีการทำงานในงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ซึ่งประกอบด้วย (1) การขจัดกิจกรรมที่ไม่มีความจำเป็น (Eliminate) (2) การรวมกิจกรรมที่ซ้ำซ้อน (Combine) (3) การจัดลำดับขั้นตอนใหม่เพื่อลดการรอคอย (Rearrange) และ (4) การลดความซับซ้อนของวิธีการทำงาน (Simplify) งานวิจัยของ Wongthong et al. [6] ที่ได้ประยุกต์ใช้หลักการ ECRS ในกระบวนการฉีดพลาสติก พบว่าสามารถลดเวลาการทำงานได้ถึงร้อยละ 9.54 โดยมีจุดคุ้มทุนเพียง 7 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือนี้ในบริบทอุตสาหกรรมของไทยอย่างชัดเจน

2.3 การวิเคราะห์สาเหตุและผล (Cause & Effect Analysis)

Ishikawa Diagram หรือ Fishbone Diagram เป็นหนึ่งในเครื่องมือ 7 QC Tools ที่ใช้ระบุและจัดกลุ่มสาเหตุของปัญหาตามหลัก 4M (Man, Machine, Method, Material) [11] การวิเคราะห์ด้วย Why-Why Analysis จะช่วยเจาะลึกถึงรากเหง้าของปัญหา (Root Cause) ก่อนการออกแบบมาตรการแก้ไข ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการ ECRC เพื่อให้มั่นใจว่าการจัดและการรวมกิจกรรมมีเหตุผลทางวิศวกรรมรองรับ

2.4 AI-Mediated Process Improvement และ Claude Cowork

Autor [7] อธิบายว่า ปัญญาประดิษฐ์มีศักยภาพสูงในการทดแทนงานที่ใช้ความคิดและมีลักษณะเป็นกิจวัตร (Routine Cognitive Tasks) ในขณะที่มนุษย์สามารถหันไปมุ่งเน้นงานที่มีความซับซ้อนและไม่ใช้กิจวัตร (Non-Routine Tasks) ได้มากขึ้น ในบริบทนี้ Claude Cowork ซึ่งเป็นผู้ช่วยอัจฉริยะ (AI Assistant) ที่ออกแบบมาสำหรับการทำงานร่วมกับ Google Workspace [8] จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างสภาพแวดล้อมการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และปัญญาประดิษฐ์ (Human-AI Collaboration) โดย Claude Cowork สามารถดำเนินการนำเข้าข้อมูล (Upload) จัดหมวดหมู่และสร้างจุดเชื่อมโยง (Hyperlink) ได้โดยอัตโนมัติผ่าน Google Apps Script กระบวนการนี้ช่วยขจัดความสูญเสียประเภท "ความรู้ที่ไม่ได้ใช้" ซึ่ง Tapping and Shuker [3] ระบุว่า เป็นความสูญเสียที่แก้ไขได้ยากที่สุดในงานสำนักงาน

3. วิธีดำเนินการวิจัย

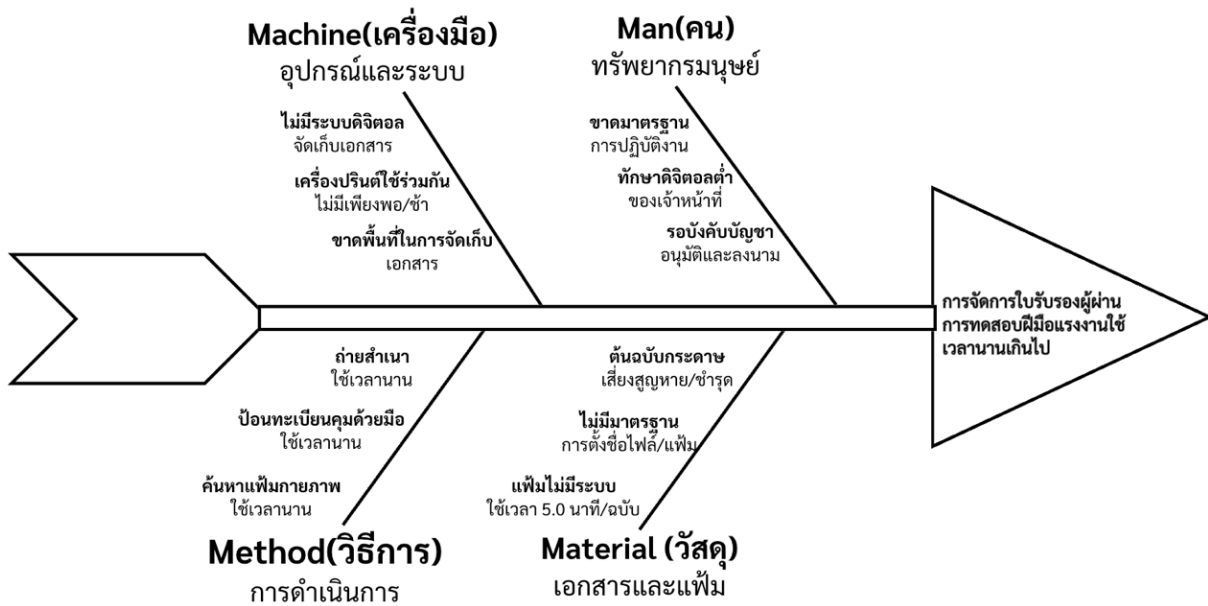
3.1 การวิเคราะห์กระบวนการปัจจุบัน (Current State Analysis)

การวิจัยนี้เป็นกรณีศึกษา ก่อนและหลังการปรับปรุง (before-and-after case study) ในสภาพแวดล้อมการทำงานจริงของศูนย์ทดสอบกรณีศึกษา คณะผู้วิจัยใช้การศึกษางานและเวลา (Time Study) ร่วมกับ VSM, Fishbone Diagram และ ECRC เพื่อวิเคราะห์กระบวนการเดิมและออกแบบกระบวนการใหม่ การวัดเวลานำและเวลาในการสืบค้นใช้เอกสารชุดเดียวกันจำนวน 30 ฉบับ ทั้งก่อนและหลังปรับปรุง เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้ Paired t-test ส่วนการประเมิน Error Rate ใช้ข้อมูลก่อนปรับปรุง 95 ฉบับย้อนหลังและหลังปรับปรุง 30 ฉบับในการทดสอบระบบ จึงวิเคราะห์ด้วย Fisher's Exact Test เนื่องจากเป็นข้อมูลสัดส่วนและขนาดกลุ่มไม่สมดุล

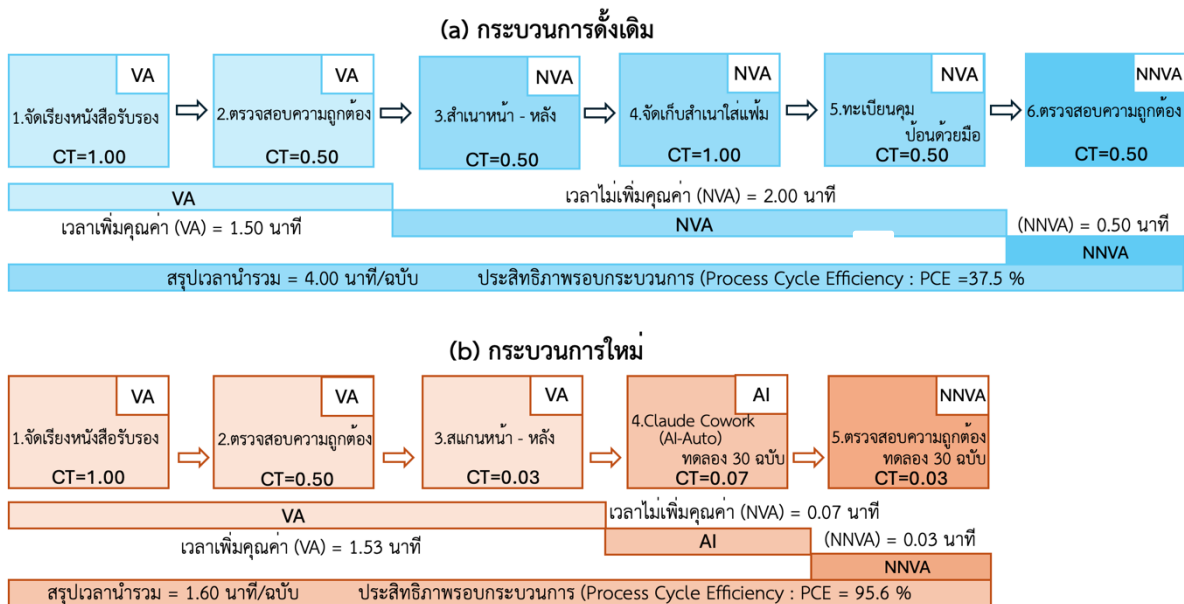
$$n = \left(\frac{z \cdot s}{e \cdot \bar{x}} \right)^2 = \left(\frac{1.96 \times 0.30}{0.05 \times 3.96} \right)^2 \approx 9 \text{ รอบ} \quad (2)$$

จำนวนรอบการจับเวลาถูกกำหนดจากการสังเกตเบื้องต้น 10 รอบ ภายใต้ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ร้อยละ 5 ดังแสดงในสมการที่ (2) จากค่าก่อนทดลองเฉลี่ย 3.96 นาทีและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.30 นาที ทำให้กำหนดรอบการวัดจริง 30 รอบ ซึ่งมากกว่าจำนวนขั้นต่ำที่คำนวณได้ผู้จับเวลาคือผู้ปฏิบัติงาน/ผู้วิจัยในสถานที่ทำงานจริง โดยใช้ขั้นตอนงาน มาตรฐานการตั้งชื่อไฟล์ และชุดเอกสารเดียวกันเพื่อลดความแปรปรวนจากความแตกต่างของเอกสาร ทั้งนี้การจับเวลาเป็น Self-Time Study จึงระบุไว้เป็นข้อจำกัดด้านความเป็นอิสระของผู้สังเกต

นอกจากนี้ ได้วิเคราะห์ความสูญเสียตามหลัก 4M ได้แก่ ด้านบุคลากร (Man) ด้านอุปกรณ์และระบบ (Machine) ด้านวิธีการปฏิบัติงาน (Method) และด้านวัสดุและเอกสาร (Material) ดังแสดงในรูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์พบว่าด้าน Method เป็นสาเหตุหลัก ได้แก่ การถ่ายสำเนา (0.5 นาที/ฉบับ) การจัดเก็บแฟ้มกายภาพ (1.0 นาที/ฉบับ) และการป้อนทะเบียนคุมด้วยมือ (0.5 นาที/ฉบับ) รวม NVA = 2.00 นาที/ฉบับ ผลการวิเคราะห์นี้ใช้เป็นฐานในการออกแบบ ECRC เพื่อขจัดสาเหตุแต่ละประการอย่างตรงจุด



รูปที่ 1 สาเหตุและผลของความสูญเสียในกระบวนการจัดการหนังสือรับรองมาตรฐานฝีมือแรงงาน (Fishbone Diagram)



รูปที่ 2 Value Stream Map (a) กระบวนการดั้งเดิม (b) กระบวนการใหม่

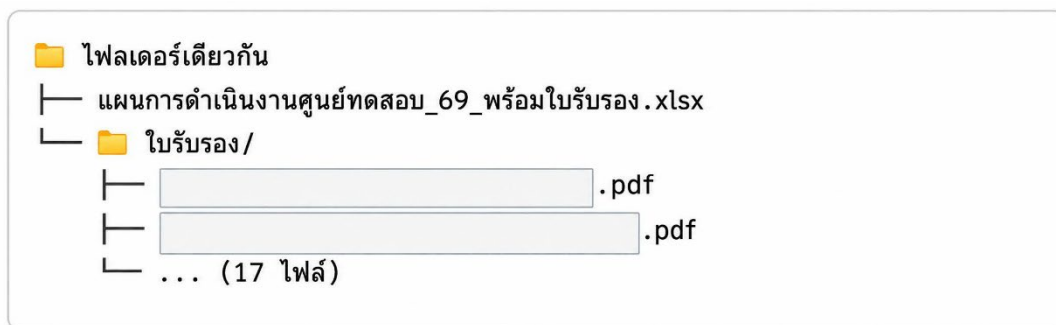
รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์สายธารคุณค่า (Value Stream Map) ระหว่างกระบวนการดั้งเดิม (Current State) และกระบวนการใหม่ (Future State) โดยพิจารณาลำดับเวลา (Timeline) ของแต่ละกิจกรรมแยกประเภท VA และ NVA พร้อมตารางเปรียบเทียบ KPI ด้านล่าง รูปที่ 2 (a) กระบวนการเดิม 6 ขั้นตอน PCE ร้อยละ 37.5 ลดลงเหลือ 5 ขั้นตอนใน Future State (b) โดย NVA ลดลงมากกว่าร้อยละ 96 เหลือเพียงความหน่วงจากการประมวลผลของปัญญาประดิษฐ์ (AI Processing Delay) ประมาณ 0.07 นาทีต่อฉบับ (คำนวณจากเวลา 2 นาทีต่อกลุ่มคำสั่ง ทหารด้วย 30 ฉบับ) ประกอบกับเวลาตรวจสอบแบบกลุ่ม (Batch Check) ประมาณ 0.03 นาทีต่อฉบับ (1 นาทีต่อ batch ÷ 30 ฉบับ) ซึ่งจัดเป็นกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่าแต่จำเป็น (NNVA)

3.2 การออกแบบกระบวนการใหม่ด้วยหลักการ ECRS

จากผลการวิเคราะห์แผนภูมิสาเหตุและผลในรูปที่ 1 และแผนผังสายธารคุณค่าสภาพปัจจุบันในรูปที่ 2 (a) ผู้วิจัยได้นำมาออกแบบสภาพที่คาดหวังในอนาคต (Future State) โดยประยุกต์ใช้หลักการลดความสูญเปล่า (ECRS) ดังนี้ (1) การขจัด (Eliminate) ได้แก่ การขจัดขั้นตอนการค้นหาแฟ้ม การบันทึกสมุดทะเบียนคุมด้วยมือ และการเดินรับ-ส่งเอกสาร (2) การรวม (Combine) ได้แก่ การรวมขั้นตอนการตรวจสอบและการบันทึกข้อมูลให้อยู่ในขั้นตอนเดียวผ่านระบบ Claude Cowork (3) การจัดลำดับใหม่ (Rearrange) ได้แก่ การปรับเปลี่ยนลำดับให้การสแกนและอัปโหลดไฟล์เกิดขึ้นก่อนการส่งมอบเอกสารต้นฉบับ (4) การลดความซับซ้อน (Simplify) ได้แก่ การกำหนดมาตรฐานการตั้งชื่อไฟล์เอกสาร และการใช้รูปแบบ (Template) ทะเบียนคุมแบบอัตโนมัติ ผลลัพธ์จากการปรับปรุงก่อให้เกิดกระบวนการใหม่ที่ลดลงเหลือ 5 ขั้นตอน โดยมีเวลาที่สร้างคุณค่า (VA Time) เท่ากับ 1.53 นาทีต่อฉบับ และสามารถลดเวลาที่ไม่มีสร้างคุณค่า (NVA Time) ลงได้มากกว่าร้อยละ 96 ซึ่งเหลือเพียงเวลาความหน่วงจากการประมวลผลของปัญญาประดิษฐ์ (AI Processing Delay) ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 5

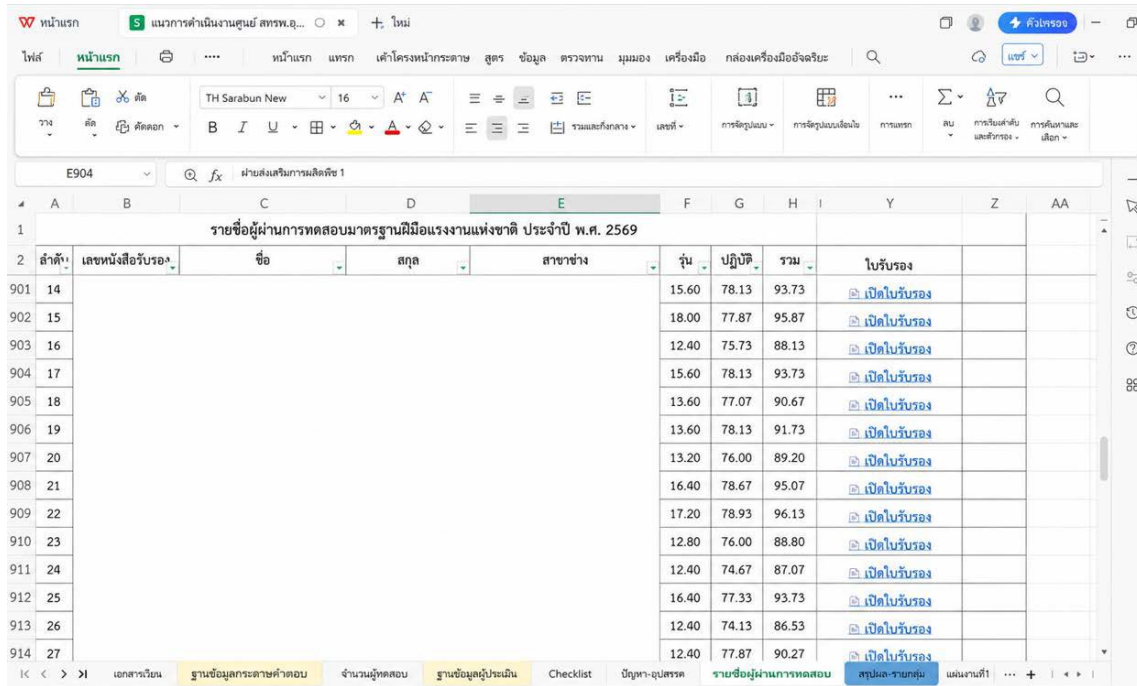
3.3 การพัฒนาระบบ Claude Cowork + Google Drive

ระบบได้รับการออกแบบให้ Claude Cowork ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยดำเนินการหลักในส่วนการไหลของข้อมูล (Information Flow) แต่ไม่ทำหน้าที่ตัดสินใจความต้องการของหนังสือรับรองหรืออนุมัติผลการทดสอบองค์ประกอบระบบ ประกอบด้วย (1) Google Drive เป็นพื้นที่จัดเก็บไฟล์ PDF ตามโครงสร้างโฟลเดอร์สาขาอาชีพ/ระดับ/ปี (2) Google Sheets เป็นทะเบียนคุมกลาง และ (3) Google Apps Script เป็นตัวเชื่อมโยงไฟล์กับทะเบียนคุมผ่านคำสั่งหรือ Trigger ที่ผู้ปฏิบัติงานเรียกใช้งาน ขั้นตอนตรรกะของสคริปต์ประกอบด้วย Detect ไฟล์ PDF ใหม่, Extract ข้อมูลจากชื่อไฟล์มาตรฐาน NSTC.[เลขที่]-[ปี][ชื่อ].pdf, Match เลขหนังสือรับรองกับแถวใน Google Sheets และ Generate Hyperlink ไปยังไฟล์ PDF ใน Drive กรณีไม่พบไฟล์ ไม่พบเลขที่ใบรับรอง หรือพบไฟล์ซ้ำระบบจะแสดงสถานะให้ตรวจสอบแทนการสร้างลิงก์โดยอัตโนมัติ



รูปที่ 3 โครงสร้างโฟลเดอร์ใน Google Drive และการตั้งชื่อไฟล์มาตรฐาน

จากรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างโฟลเดอร์จริงในระบบและรูปแบบการตั้งชื่อไฟล์มาตรฐาน ซึ่งช่วยให้ Apps Script ค้นหาและจับคู่ไฟล์กับเลขที่ใบรับรองในทะเบียนคุมได้อย่างเป็นระบบ ขั้นตอนการติดตั้งแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ (1) อัปโหลดโฟลเดอร์ “ใบรับรองผู้ผ่านการทดสอบ” ขึ้นสู่ Google Drive (2) แปลงไฟล์ทะเบียนคุมเป็น Google Sheets (3) ติดตั้ง Apps Script ผ่านเมนู Extensions และกำหนดสิทธิ์เฉพาะบัญชีผู้รับผิดชอบ และ (4) เรียกใช้คำสั่ง “ใส่ลิงก์ใบรับรองจาก Drive” เพื่อสร้าง Hyperlink ผลลัพธ์ของทะเบียนคุมแสดงในรูปที่ 4



ลำดับ	เลขหนังสือรับรอง	ชื่อ	สกุล	สาขาช่าง	รุ่น	ปฏิบัติ	รวม	ใบรับรอง
14					15.60	78.13	93.73	เปิดใบรับรอง
15					18.00	77.87	95.87	เปิดใบรับรอง
16					12.40	75.73	88.13	เปิดใบรับรอง
17					15.60	78.13	93.73	เปิดใบรับรอง
18					13.60	77.07	90.67	เปิดใบรับรอง
19					13.60	78.13	91.73	เปิดใบรับรอง
20					13.20	76.00	89.20	เปิดใบรับรอง
21					16.40	78.67	95.07	เปิดใบรับรอง
22					17.20	78.93	96.13	เปิดใบรับรอง
23					12.80	76.00	88.80	เปิดใบรับรอง
24					12.40	74.67	87.07	เปิดใบรับรอง
25					16.40	77.33	93.73	เปิดใบรับรอง
26					12.40	74.13	86.53	เปิดใบรับรอง
27					12.40	77.87	90.27	เปิดใบรับรอง

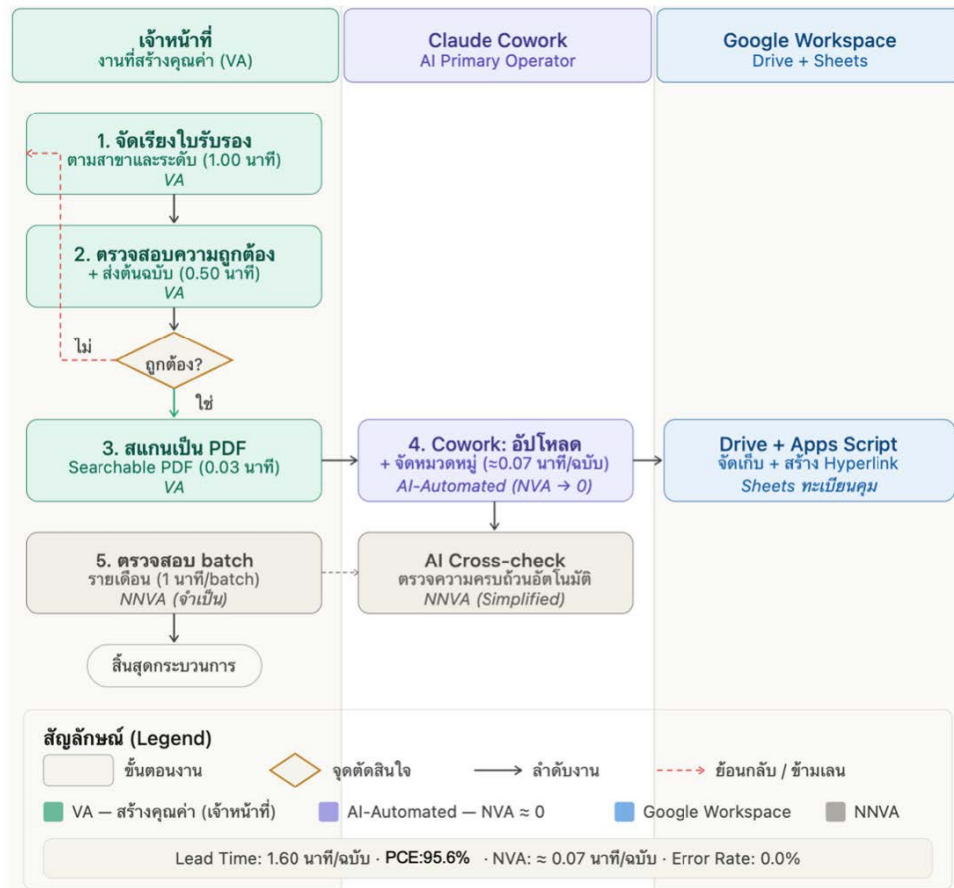
รูปที่ 4 ทะเบียนคุมใบรับรองใน Google Sheets พร้อม Hyperlink เชื่อมโยงไฟล์ PDF อัตโนมัติ

จากรูปที่ 4 แสดงตัวอย่างทะเบียนคุมใบรับรองใน Google Sheets โดยข้อมูลชื่อ-สกุลและคะแนนที่ปรากฏในภาพเป็น Mock Data เพื่อสาธิตการทำงานเท่านั้น ไม่ใช่ข้อมูลจริงของผู้เข้ารับการทดสอบ การบันทึกข้อมูลประกอบด้วยลำดับที่ เลขหนังสือรับรอง ชื่อ-สกุล คะแนนความรู้ คะแนนปฏิบัติ และคะแนนรวม พร้อมปุ่ม “เปิดใบรับรอง” ที่ Apps Script สร้างขึ้นโดยอัตโนมัติเพื่อเชื่อมโยงไปยังไฟล์ PDF ใน Google Drive ผู้ใช้สามารถสืบค้นได้ด้วย Ctrl + F หรือ Google Sheets Filter โดยไม่ต้องเปิดแฟ้มภาพ ใบรับรองต้นฉบับยังคงส่งมอบให้ผู้ผ่านการทดสอบโดยตรง ระบบจัดเก็บเฉพาะไฟล์ดิจิทัลเพื่อการสำรองและสืบค้นย้อนหลัง

มาตรการคุ้มครองข้อมูลกำหนดไว้ 5 ประการ ได้แก่ (1) ใช้ Mock Data ในภาพประกอบบทความและการนำเสนอภายนอก (2) จำกัดสิทธิ์เข้าถึงไฟล์เตอร์และ Google Sheets เฉพาะผู้รับผิดชอบงาน (3) สำรองข้อมูลไฟล์ PDF และทะเบียนคุมเป็นรอบเพื่อป้องกันการสูญหาย (4) ใช้ประวัติการแก้ไขและ audit log ของ Google Workspace เพื่อตรวจสอบย้อนหลัง และ (5) กำหนดจุดตรวจสอบโดยมนุษย์ก่อนส่งมอบหรือเผยแพร่ข้อมูล เพื่อให้การดำเนินงานสอดคล้องกับหลักการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลและลดความเสี่ยงจากการเปิดเผยข้อมูลเกินความจำเป็น [13]

3.4 ผังการปฏิบัติงานกระบวนการใหม่ (Future State Flow)

รูปที่ 5 แสดงผังการปฏิบัติงาน (Flow Diagram) ของกระบวนการใหม่ (Future State) ทั้ง 5 ขั้นตอน พร้อมระบุเอกสารและระบบที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน จุดตัดสินใจ (Decision Point) ที่สำคัญ และอธิบายสัญลักษณ์ (Legend) ทุกชนิด



รูปที่ 5 ผังการปฏิบัติงานกระบวนการจัดการหนังสือรับรองฝีมือแรงงานแห่งชาติ (Future State, 5 ขั้นตอน)

จากรูปที่ 5 กระบวนการใหม่ 5 ขั้นตอนแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามผู้ดำเนินการ ได้แก่ (1) กิจกรรมที่สร้างคุณค่า (Value-Added) ซึ่งเจ้าหน้าที่ดำเนินการจัดเรียงใบรับรอง ตรวจสอบความถูกต้อง ส่งต้นฉบับให้ผู้ผ่านการทดสอบ และสแกนเป็นไฟล์ PDF ที่รองรับการค้นหา และ (2) กิจกรรมการไหลของข้อมูลซึ่งดำเนินการด้วยระบบดิจิทัล/AI-Assisted Workflow ได้แก่ การนำเข้าไฟล์ การจัดหมวดหมู่ และการสร้าง Hyperlink ในทะเบียนคุม Google Sheets จุดตรวจสอบโดยมนุษย์ยังคงอยู่ในขั้นตอนตรวจสอบเอกสารและตรวจสอบความครบถ้วนของลิงก์ จึงกำหนดขอบเขตการตัดสินใจของ AI ไว้เฉพาะการจัดการข้อมูลและการเชื่อมโยงไฟล์ ไม่ให้การรับรองผลการทดสอบหรือการอนุมัติเอกสาร

จุดสำคัญของการออกแบบนี้คือการเปลี่ยนภาระงานซ้ำซ้อนจากมนุษย์ไปสู่ระบบดิจิทัล โดยยังคงให้เจ้าหน้าที่รับผิดชอบกิจกรรมที่ต้องใช้การตัดสินใจและความรับผิดชอบต่อเอกสารต้นฉบับ การออกแบบดังกล่าวช่วยแยกบทบาทระหว่างงานที่สร้างคุณค่า งานรอคอย และงานประมวลผลข้อมูลอย่างชัดเจน ก่อนเข้าสู่การวัดผลเชิงปริมาณในหัวข้อถัดไป

3.5 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ (Key Performance Indicators)

คณะผู้วิจัยกำหนดตัวชี้วัดประสิทธิภาพหลัก 4 ตัว และนิยามเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้ Lead Time คือเวลารวมตั้งแต่รับหนังสือรับรองจนกระทั่งจัดเก็บหรือบันทึกเสร็จสมบูรณ์ Touch Time คือเวลาที่เจ้าหน้าที่ลงมือปฏิบัติงานกับเอกสารจริง เช่น จัดเรียง ตรวจสอบ และสแกน Waiting Time คือเวลารอหรือเวลาที่เอกสารค้างอยู่โดยไม่ได้ถูกดำเนินการ AI Processing Time คือเวลาที่ระบบประมวลผลเป็นกลุ่มคำสั่งเพื่ออัปโหลด จัดเก็บ และสร้าง Hyperlink ในทะเบียนคุม และ Retrieval Time คือเวลาตั้งแต่เริ่มค้นหาเลขที่/ชื่อในระบบจนเปิดเอกสาร PDF ได้สำเร็จ ตัวชี้วัดหลักประกอบด้วย (1) Lead Time ต่อฉบับ (2) PCE ตามสมการที่ (1) (3) Error Rate ตามสมการที่ (3) โดย Error หมายถึงข้อมูลในทะเบียนคุมไม่ตรงกับ

ใบรับรองต้นฉบับหรือ Hyperlink ใช้งานไม่ได้ และ (4) Retrieval Time จากการสุ่มสืบค้น 30 รายการทั้งก่อนและหลังปรับปรุง

$$\text{Error Rate} = (\text{จำนวนเอกสารที่มีข้อมูลผิดพลาด} / \text{จำนวนเอกสารทั้งหมดที่ตรวจสอบ}) \times 100 \quad (3)$$

4. ผลการวิจัย

4.1 การเปรียบเทียบกระบวนการด้วย ECRS

ตารางที่ 1 สรุปผลการวิเคราะห์กิจกรรมทั้ง 6 ขั้นตอนในกระบวนการดั้งเดิม เปรียบเทียบกับ 5 ขั้นตอน ในกระบวนการใหม่ โดยจำแนกประเภทกิจกรรมเป็นกิจกรรมที่เพิ่มคุณค่า (VA : Value-Added) กิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า (NVA : Non-Value-Added) และกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่าแต่จำเป็น (NNVA : Necessary Non-Value-Added) พร้อมระบุ ECRS Action ที่ใช้ปรับปรุงแต่ละขั้นตอน

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ความสูญเสีย (Muda) และผล ECRS ก่อนและหลังการพัฒนาระบบ

กิจกรรม	ก่อน	หลัง	ECRS Action
1. จัดเรียงหนังสือรับรอง (1.00 นาที) (ขั้นตอนที่ 1 ก่อน-หลัง)	VA	VA	คงไว้ (ต้องการการตัดสินใจ)
2. ตรวจสอบความถูกต้อง และส่งต้นฉบับให้ผู้ผ่านการทดสอบ (0.50 นาที) (ขั้นตอนที่ 2 ก่อน-หลัง)	VA	VA	คงไว้ (ต้องการการตัดสินใจ)
3. ถ่ายสำเนาหน้าหลัง (0.50 นาที) (ขั้นตอนที่ 3 ก่อน)	NVA	—	Eliminate ✓ → สแกน PDF แทน
4. สแกนไฟล์หน้าหลัง (0.03 นาที) (ขั้นตอนที่ 3 หลัง)	—	VA	ใหม่ (แทนถ่ายสำเนา)
5. จัดเก็บสำเนาใส่แฟ้ม (1.00 นาที) (ขั้นตอนที่ 4 ก่อน)	NVA	—	Eliminate ✓ → Cowork อับโหลด
6. Cowork: อับโหลด จัดหมวดหมู่ + Apps Script สร้างจุดเชื่อมโยง (Hyperlink) ใน Google Sheets (2 นาที/batch) (ขั้นตอนที่ 4 หลัง)	—	AI	ใหม่ — Combine+Simplify
7. ทะเบียนคุมป้อนด้วยมือ (0.50 นาที) (ขั้นตอนที่ 5 ก่อน)	NVA	—	Eliminate ✓ → Apps Script
8. ตรวจสอบ batch (1 นาที/batch) (ขั้นตอนที่ 6 ก่อน, ขั้นตอนที่ 5 หลัง)	NNVA	NNVA	Simplify (AI ช่วย)

จากตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกระบวนการอย่างชัดเจน โดยกระบวนการเดิมที่มีกิจกรรมไม่เพิ่มคุณค่า (NVA) แฝงอยู่ถึง 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การถ่ายสำเนา การจัดเก็บแฟ้ม และการป้อนข้อมูลด้วยมือ ได้ถูกขจัดและควมรวบด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์ ส่งผลให้จำนวนขั้นตอนรวมลดลงจาก 6 ขั้นตอนเหลือ 5 ขั้นตอน

ประเด็นสำคัญจากการวิเคราะห์คือ กิจกรรมประเภท NVA ทางกายภาพ ถูกแทนที่ด้วยกิจกรรมที่สร้างคุณค่า (VA) แบบดิจิทัล เช่น การสแกนไฟล์ที่รองรับการค้นหา (Searchable PDF) ในขณะที่ภาระงานบันทึกข้อมูลและสร้างจุดเชื่อมโยง (Hyperlink) ถูกโอนย้ายไปยังระบบประมวลผลอัตโนมัติ (AI-Automated) ทั้งหมด ผลจากการประยุกต์ใช้ ECRS นี้ เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เวลานำ (Lead Time) ลดลงอย่างก้าวกระโดดในผลการทดสอบเชิงปริมาณระยะถัดไป ซึ่งสอดคล้องกับหลักการ Lean ที่มุ่งเน้นการจัดความซับซ้อนของกระบวนการ

4.2 ผลลัพธ์เชิงปริมาณ (KPI Results)

ตารางที่ 2 แสดงผลการวัด KPI ทั้ง 4 ตัวชี้วัด ที่เปรียบเทียบค่าก่อนและหลังการนำระบบ Claude Cowork + Google Drive ไปใช้จริงในการทดสอบ 30 รอบ ภายใต้ความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 2 สรุปผล KPI ก่อนและหลังการพัฒนาระบบ Claude Cowork + Google Drive

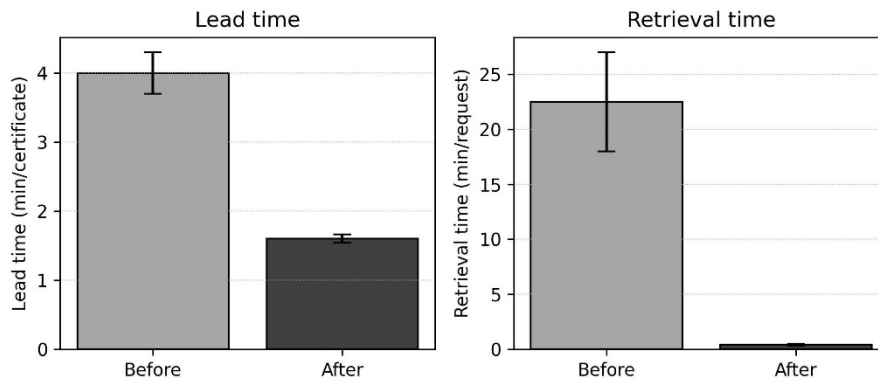
KPI	ก่อน	หลัง	Δ (การเปลี่ยนแปลงก่อน-หลัง)
Lead Time (นาที/ฉบับ)	4.00 $\pm$ 0.30	1.60 $\pm$ 0.06	↓ 60.0%*
PCE (%)	37.5	95.6	↑ 58.1 pp
Error Rate (%) [n=95/30]	4.2	0.0	ไม่พบข้อผิดพลาดหลังปรับปรุง†
Retrieval Time (นาที)	15–30	< 0.5	↓ 98.22%*
จำนวนขั้นตอน	6	5	↓ 16.7%
VA Time (นาที/ฉบับ)	1.50	1.53	+0.03 (เพิ่ม สแกน)
NVA Time (นาที/ฉบับ)	2.00	$\approx$ 0.07†	ลดลงเชิงกิจกรรม

หมายเหตุ: Δ หมายถึงการเปลี่ยนแปลงก่อน-หลัง; * Paired t-test $p < 0.001$; † Fisher's Exact Test $p = 0.062$ จึงรายงานเป็นแนวโน้มการลดลง ไม่ใช่ผลลัพธ์ที่ระดับ 0.05; ‡ AI Processing Time = 2 นาที/batch $\div$ 30 = 0.067 นาที/ฉบับ

จากตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวชี้วัดประสิทธิภาพพบว่าเวลานำ (Lead Time) ลดลงจาก 4.00 $\pm$ 0.30 นาทีต่อฉบับ เหลือ 1.60 $\pm$ 0.06 นาทีต่อฉบับ ขณะที่ PCE เพิ่มจากร้อยละ 37.5 เป็นร้อยละ 95.6 สัญลักษณ์ Δ ในตารางหมายถึงการเปลี่ยนแปลงก่อน-หลังการปรับปรุง โดยค่าลดลงแสดงด้วยลูกศรลงและค่าเพิ่มขึ้นแสดงด้วยลูกศรขึ้น

นอกจากนี้ Retrieval Time ถูกแสดงเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตั้งแต่ต้น ไม่รายงานเฉพาะช่วงเวลา โดยลดลงจาก 22.5 $\pm$ 4.5 นาที เป็น 0.4 $\pm$ 0.1 นาทีต่อครั้ง ส่วน Error Rate ลดจาก 4.2% เป็น 0.0% ในกลุ่มตัวอย่างหลังปรับปรุง แต่การตีความต้องพิจารณาร่วมกับผล Fisher's Exact Test ในตารางที่ 3 เนื่องจากค่า $p = 0.062$ ยังสูงกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05

การทดสอบ Paired t-test ดำเนินการกับข้อมูลเวลา 30 คู่จากเอกสารชุดเดียวกัน ทั้ง Lead Time และ Retrieval Time จึงควบคุมความแปรปรวนจากความแตกต่างของเอกสารได้ในระดับหนึ่ง ค่า effect size สำหรับข้อมูลจับคู่รายงานเป็น Cohen's d_z ซึ่งคำนวณจาก $t/\sqrt{n}$ โดย Lead Time มี $d_z = 8.02$ และ Retrieval Time มี $d_z = 4.91$ แสดงผลกระทบเชิงปฏิบัติการขนาดใหญ่มาก ทั้งนี้ การคำนวณช่วงความเชื่อมั่น 95% ในตารางที่ 3 อ้างอิงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ $n = 30$ ที่รายงานในข้อมูลจริง



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยก่อนและหลังปรับปรุงพร้อม error bar ($\pm$ SD) ของ Lead Time และ Retrieval Time

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติของแต่ละ KPI โดยใช้ Paired t-test สำหรับข้อมูลเวลา ($n = 30$

คู่) และ Fisher's Exact Test สำหรับ Error Rate (ก่อน $n = 95$, หลัง $n = 30$) ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบทางสถิติสำหรับตัวชี้วัดประสิทธิภาพหลัก

KPI	ก่อน ($\bar{x} \pm SD$; 95% CI)	หลัง ($\bar{x} \pm SD$; 95% CI)	สถิติ/effect size	p	การแปลผล
Lead Time (นาทีก)	4.00 $\pm$ 0.30; 3.89–4.11	1.60 $\pm$ 0.06; 1.58–1.62	$t=43.9$; $d_z=8.02$	<0.001	มีนัยสำคัญ
Retrieval Time (นาทีก)	22.5 $\pm$ 4.5; 20.82–24.18	0.4 $\pm$ 0.1; 0.36–0.44	$t=26.9$; $d_z=4.91$	<0.001	มีนัยสำคัญ
Error Rate (%)	4.2% (4/95)	0.0% (0/30)	Fisher's Exact Test	0.062	แนวโน้มลดลง; ยังไม่ถึง $p<0.05$
PCE (%)	37.5	95.6	คำนวณจาก Lead Time	—	เพิ่มขึ้นเชิงกระบวนการ

หมายเหตุ: ระดับนัยสำคัญหลักกำหนดที่ $p < 0.05$; *** $p < 0.001$; ค่า $p = 0.062$ ของ Error Rate สูงกว่า 0.05 จึงไม่ถือว่ามีความนัยสำคัญทางสถิติ แต่สามารถรายงานเป็นแนวโน้มที่ควรติดตามเพิ่มเติมได้

จากตารางที่ 3 พบว่า Lead Time ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = 43.9$, $p < 0.001$) จาก 4.00 ± 0.30 นาที ต่อฉบับ เหลือ 1.60 ± 0.06 นาทีต่อฉบับ ส่วน Retrieval Time ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = 26.9$, $p < 0.001$) จาก 22.5 ± 4.5 นาที เหลือ 0.4 ± 0.1 นาที ผลดังกล่าวสอดคล้องกับภาพรวมในรูปที่ 6 และสนับสนุนว่าการเปลี่ยนจากแฟ้ม ภายนอกและการป้อนข้อมูลด้วยมือไปสู่ Hyperlink และการค้นหาใน Google Sheets ช่วยลดเวลารอและเวลาค้นหาได้อย่าง ชัดเจน

สำหรับอัตราความคลาดเคลื่อน (Error Rate) ระบบเดิมพบข้อผิดพลาด 4 จาก 95 ฉบับ (4.2%) ขณะที่ระบบใหม่ ไม่พบข้อผิดพลาดในกลุ่มตัวอย่างทดสอบ 30 ฉบับ (0.0%) เมื่อทดสอบด้วย Fisher's Exact Test ได้ $p = 0.062$ ซึ่งยังไม่ถึง เกณฑ์นัยสำคัญ $p < 0.05$ จึงไม่ควรสรุปว่า Error Rate ลดลงอย่างมีนัยสำคัญหรือ “ลดลง 100%” ในเชิงสถิติ แต่ควร รายงานว่าไม่พบข้อผิดพลาดในกลุ่มตัวอย่างหลังปรับปรุงและมีแนวโน้มลดลง ในการยืนยันผลระยะถัดไปควรเก็บข้อมูลหลัง ปรับปรุงอย่างน้อย $n \geq 95$ เพื่อให้สอดคล้องกับกลุ่มก่อนและเพิ่มอำนาจการทดสอบ

4.3 การวิเคราะห์ความไวของขนาดกลุ่มคำสั่ง (Batch Size Sensitivity)

เนื่องจาก AI Processing Time ในระบบจริงใช้เวลาประมาณ 2 นาทีต่อหนึ่งกลุ่มคำสั่ง (batch) จึงวิเคราะห์ความไวของขนาด batch โดยคงค่าคงที่ของกิจกรรมอื่นไว้ที่ 1.53 นาทีต่อฉบับ และเปลี่ยนเฉพาะ AI Processing Time ตามสูตร $2 \text{ นาที} \div \text{จำนวนเอกสารต่อ batch}$ ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงสถานการณ์จากข้อมูลเวลาจริง ไม่ใช่การทดลองซ้ำทุกขนาด batch

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความไวของขนาดกลุ่มคำสั่งต่อเวลานำที่ประมาณการ

ขนาด batch (ฉบับ)	AI Processing Time (นาที/ฉบับ)	Lead Time ประมาณการ (นาที/ฉบับ)	ลดลงจากระบบเดิม (%)
10	0.20	1.73	56.8
20	0.10	1.63	59.3
30 (ค่าที่ใช้จริง)	0.07	1.60	60.0
50	0.04	1.57	60.8
100	0.02	1.55	61.3

จากตารางที่ 4 เมื่อ batch มีขนาดเล็กลง เวลาประมวลผลต่อฉบับจะเพิ่มขึ้น แต่แม้ในกรณี batch ขนาด 10 ฉบับ เวลานำประมาณการยังต่ำกว่าระบบเดิมมากกว่า 50% การรายงานนี้ช่วยจำกัดขอบเขตข้อสรุปว่า ผลลัพธ์ 1.60 นาทีต่อฉบับ อ้างอิงเงื่อนไขการประมวลผลจริงที่ batch 30 ฉบับ

4.4 การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis)

เพื่อยืนยันความคุ้มค่าในการลงทุนพัฒนาระบบ ตารางที่ 5 วิเคราะห์มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเวลาที่ประหยัดได้ โดยอิงอัตราค่าจ้างขั้นต่ำ จ.ขอนแก่น พ.ศ. 2568 = 357 บาท/วัน (8 ชั่วโมง) คูณด้วย Overhead Factor 2.19 ได้ 97.73 บาท/ชั่วโมง และประมาณการปริมาณงาน 200 ฉบับ และ 200 ครั้งการสืบค้นต่อปี

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ก่อนและหลังการพัฒนาระบบ

รายการ	ก่อน	หลัง	ประหยัด
เวลาจัดเก็บ/ฉบับ (นาที)	4.00	1.60	2.40 นาที
เวลารวม/ปี 200 ฉบับ (ชั่วโมง)	13.3	5.3	8.0 ชม.
มูลค่าเวลาจัดเก็บ/ปี (บาท)	1,303	521	782 บาท
เวลาสืบค้น/ปี* (ชั่วโมง)	75.0	1.3	73.7 ชม.
มูลค่าเวลาสืบค้น/ปี (บาท)	7,330	130	7,199 บาท
ต้นทุนพัฒนาระบบ (บาท)	—	2,500	—
ผลประโยชน์รวม/ปี (บาท)	—	—	7,981 บาท
จุดคุ้มทุน	—	—	< 4 เดือน

หมายเหตุ: *สืบค้น 200 ครั้ง/ปี . เฉลี่ย 22.5 นาที (ก่อน จากการวัดจริง 30 ครั้ง ช่วง 15–30 นาที) และ 0.4 นาที (หลัง), Sensitivity Analysis $\pm 20\%$: 6,385–9,577 บาท/ปี จุดคุ้มทุน 3.1–4.7 เดือน

จากตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินผลตอบแทนจากการพัฒนาระบบ โดยอ้างอิงอัตราค่าจ้างขั้นต่ำของจังหวัดขอนแก่น (357 บาท/วัน) รวมกับค่าใช้จ่ายดำเนินงาน (Overhead Factor) ที่ระดับ 2.19 ส่งผลให้ต้นทุนเวลาบุคลากรอยู่ที่ 97.73 บาท/ชั่วโมง ภายใต้สมมติฐานปริมาณงานจัดการเอกสารและสืบค้นอย่างละ 200 ครั้งต่อปี

ผลการวิเคราะห์พบว่า กระบวนการใหม่สามารถประหยัดเวลาในการปฏิบัติงานรวมได้ทั้งสิ้น 81.7 ชั่วโมงต่อปี (ประกอบด้วยเวลาจัดเก็บ 8.0 ชั่วโมง และเวลาสืบค้น 73.7 ชั่วโมง) เมื่อคำนวณเป็นมูลค่าทางการเงินเทียบเท่า สามารถสร้างผลประโยชน์ได้ 7,981 บาทต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนคงที่ในการพัฒนาระบบเริ่มต้นที่ 2,500 บาท ส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของโครงการนี้สั้นมาก คือใช้เวลาเพียงไม่ถึง 4 เดือน

นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) โดยปรับความผันผวนของฐานค่าจ้างและปริมาณงาน ที่ระดับ $\pm 20\%$ แสดงให้เห็นว่าผลประโยชน์รวมจะยังคงอยู่ในช่วง 6,385 ถึง 9,577 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนอยู่ระหว่าง 3.1 ถึง 4.7 เดือน ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่าการลงทุนในระบบ AI-Mediated Lean Office ด้วยต้นทุนต่ำ (Low-Code/No-Code Approach) มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์และมีความเสี่ยงต่ำในทุกสถานการณ์

5. อภิปรายผล

การอภิปรายผลมุ่งอธิบายกลไกของการลดเวลาและข้อจำกัดของหลักฐานเชิงสถิติ โดยไม่สรุปเกินกว่าข้อมูลที่มีได้ในกรณีศึกษา

5.1 ผลของการลดกิจกรรมที่ไม่สร้างคุณค่า: การลด Lead Time จาก 4.00 เป็น 1.60 นาทีต่อฉบับเกิดจากการตัดกิจกรรมทางกายภาพที่ไม่สร้างคุณค่าออกเป็นหลัก ได้แก่ การถ่ายสำเนาและการจัดเก็บแฟ้มกายภาพ รวมถึงการลดการป้อนทะเบียนคุมด้วยมือ ผลนี้สอดคล้องกับหลัก Lean Office และ VSM ที่เน้นการจัดกิจกรรมที่ใช้ทรัพยากรแต่ไม่เพิ่มคุณค่าต่อผู้รับบริการ [2–3], [9]

5.2 ผลของระบบดิจิทัลและ Hyperlink: Retrieval Time ลดลงจาก 22.5 เป็น 0.4 นาทีต่อครั้ง โดยกลไกสำคัญคือการเลิกค้นแฟ้มกระดาษและเปลี่ยนเป็นการค้นหาใน Google Sheets ที่เชื่อมต่อไฟล์ PDF ผ่าน Hyperlink ผลส่วนนี้จึงเกิดจากการบูรณาการระบบเอกสารดิจิทัลและ Apps Script มากกว่าการใช้ AI เพียงอย่างเดียว

5.3 การจัดการข้อผิดพลาดและข้อจำกัดทางสถิติ: การไม่พบข้อผิดพลาดในกลุ่มตัวอย่างหลังปรับปรุงเป็นผลเชิงปฏิบัติการที่ดี แต่ Fisher's Exact Test ให้ $p = 0.062$ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ $p < 0.05$ จึงควรตีความเป็นแนวโน้มลดลงและเป็นหลักฐานเบื้องต้นเท่านั้น ข้อจำกัดสำคัญคือจำนวนตัวอย่างก่อนและหลังไม่สมดุล (95 เทียบกับ 30 ฉบับ) จึงยังไม่เพียงพอสำหรับการสรุปเชิงนโยบายว่าระบบลด Error Rate ได้อย่างมีนัยสำคัญ

5.4 การแยกผลของ ECRS ออกจากผลของ AI-Assisted Workflow: ในระดับกิจกรรม ECRS ช่วยจัดการถ่ายสำเนาและการจัดเก็บแฟ้มกายภาพ ส่วนระบบดิจิทัล/AI-Assisted Workflow ช่วยแทนการป้อนทะเบียนคุมด้วยมือและสร้าง Hyperlink อัตโนมัติ ดังนั้นข้อค้นพบของงานนี้ควรอธิบายว่าเป็นผลรวมของ Lean/ECRS, Google Workspace, Apps Script และการช่วยงานของ Claude Cowork ไม่ใช่ผลจาก AI เพียงองค์ประกอบเดียว

5.5 ความคุ้มค่าและเงื่อนไขการขยายผล: ผลประโยชน์รวม 7,981 บาทต่อปีและระยะเวลาคืนทุนประมาณ 4 เดือน สะท้อนความเหมาะสมของแนวทาง Low-Code/No-Code สำหรับหน่วยงานที่มีปริมาณเอกสารระดับกลาง อย่างไรก็ตาม การขยายผลสู่ปริมาณงานมากขึ้นควรพิจารณาข้อจำกัดของ Google Drive/Sheets, Apps Script Quota สิทธิ์เข้าถึงข้อมูล การสำรองข้อมูล และการยอมรับของผู้ใช้งาน เพื่อให้ผลการปรับปรุงมีความยั่งยืนและปลอดภัย

6. สรุป

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้วิศวกรรมกระบวนการ (ECRS) ร่วมกับระบบดิจิทัลและ AI-Assisted Lean Office สามารถปรับปรุงกระบวนการจัดการหนังสือรับรองของศูนย์ทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานกรณีศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีผลลัพธ์เชิงประจักษ์ดังนี้

6.1 การลดความสูญเสียเชิงเวลา: เวลารนำ (Lead Time) ของกระบวนการลดลงร้อยละ 60.0 จาก 4.00 นาที เหลือเพียง 1.60 นาทีต่อฉบับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ส่งผลให้ประสิทธิภาพรอบกระบวนการ (PCE) เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 37.5 เป็นร้อยละ 95.6

6.2 การยกระดับคุณภาพและเพิ่มมูลค่า: ระบบใหม่ไม่พบข้อผิดพลาดในกลุ่มตัวอย่างหลังปรับปรุง 30 ฉบับ และลดเวลาสืบค้น (Retrieval Time) ลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.001$) จากเฉลี่ย 22.5 นาที เหลือเพียง 0.4 นาทีต่อครั้ง อย่างไรก็ตาม ผล Error Rate ควรตีความเป็นแนวโน้มลดลง เนื่องจากค่า $p = 0.062$ ยังไม่ถึงเกณฑ์นัยสำคัญ 0.05

6.3 ความคุ้มค่าและความยั่งยืน: การปรับปรุงกระบวนการในครั้งนี้สามารถสร้างผลประหยัดเวลาการทำงานรวม 81.7 ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ 7,981 บาทต่อปี โดยมีระยะเวลาคืนทุนน้อยกว่า 4 เดือน ข้อจำกัดของงานวิจัย ได้แก่ (1) เป็นกรณีศึกษาเดียวในศูนย์ทดสอบแห่งหนึ่ง ปริมาณงานประมาณ 200 ฉบับต่อปี จึงอาจไม่ครอบคลุมหน่วยงานที่มีปริมาณเอกสารสูงมาก (2) การวัดเวลาเป็น Self-Time Study แม้ควบคุมด้วยเอกสารชุดเดียวกัน แต่ยังคงมีโอกาสจากผู้สังเกต (3) กลุ่มตัวอย่าง Error Rate ก่อนและหลังไม่สมดุล (95 และ 30 ฉบับ) ส่งผลให้อำนาจทดสอบค่อนข้างต่ำ (4) ยังไม่มีข้อมูลรายฉบับสำหรับจัดทำ Boxplot เต็มรูปแบบ จึงแสดงกราฟค่าเฉลี่ยพร้อม Error Bar จากข้อมูลสรุปจริง และ (5) ยังไม่ได้ประเมินความพึงพอใจหรือการยอมรับของผู้ใช้งาน

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต ได้แก่ (1) เก็บข้อมูลหลังปรับปรุงให้มีขนาดอย่างน้อยเท่ากับข้อมูลก่อนปรับปรุงเพื่อยืนยันผล Error Rate (2) เก็บข้อมูลเวลารายฉบับและราย batch เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนและสร้าง Boxplot ได้ครบถ้วน (3) พัฒนาการเชื่อมต่อ API กับระบบฐานข้อมูลกลางของกรมพัฒนาฝีมือแรงงานโดยตรง (4) ประเมินความพึงพอใจและการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งานตามกรอบ TAM และ (5) จัดทำแนวปฏิบัติด้าน Data Governance เช่น สิทธิ์เข้าถึง การสำรองข้อมูล Audit Log และระยะเวลาเก็บรักษาเอกสารดิจิทัล

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้บริหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Government of Thailand, *Skill Development Promotion Act B.E. 2545 (2002)*, Bangkok, Thailand, 2002 (in Thai).
- [2] J. P. Womack and D. T. Jones, *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, 2nd ed. New York, NY, USA: Free Press, 2003.
- [3] D. Tapping and T. Shuker, *Value Stream Management for the Lean Office*, New York, NY, USA: Productivity Press, 2003.
- [4] T. Ohno, *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*, Cambridge, MA, USA: Productivity Press, 1988.

- [5] B. Dhinnabutra, “Application of Lean Concepts and Digital Technology for Improving Administrative Processes: A Case Study of the Research, Academic Service, and Testing Center, RMUTI, Khon Kaen Campus,” in *Proceedings of the 10th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference (RMTC 2025)*, Khon Kaen, Thailand, 2025, Paper POM-102, pp. 1–9 (in Thai).
- [6] R. Wongthong, T. Khuenkaew, A. Nommanas, P. Jiandon, P. Baowan, and C. Kulliap, “Reducing Changeover Time in the Plastic Injection Process: Case Study,” *Journal of Manufacturing and Management Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 35–44, 2025 (in Thai).
- [7] D. H. Autor, “Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation,” *Journal of Economic Perspectives*, vol. 29, no. 3, pp. 3–30, 2015.
- [8] Anthropic, “Claude: AI Assistant for Productivity and Workflow Automation,” 2025. [Online]. Available: <https://www.anthropic.com/claude> (accessed Jan. 10, 2026).
- [9] M. Rother and J. Shook, *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda*, Cambridge, MA, USA: Lean Enterprise Institute, 1999.
- [10] R. M. Barnes, *Motion and Time Study: Design and Measurement of Work*, 7th ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1980.
- [11] K. Ishikawa, *Guide to Quality Control*, Tokyo, Japan: Asian Productivity Organization, 1986.
- [12] Office of the Civil Service Commission, *Guidelines for Digital Government Development*, Bangkok, Thailand: Office of the Civil Service Commission, 2021 (in Thai).
- [13] Government of Thailand, *Personal Data Protection Act B.E. 2562 (2019)*, Bangkok, Thailand, 2019 (in Thai).

Enhancing Supply Chain Transparency Using Blockchain Technology

Hazanal Rashid Khan Rajamohamed^{1*}

¹Faculty of Business Administration, St Teresa International University Lecturer,

Ongkharak, Nakhon Nayok, 26120

*Corresponding author Email: khan@trsu.ac.th

(Received: May 13, 2026; Revise: June 19, 2026; Accepted: June 29, 2026)

Abstract

Supply chain transparency is essential in creating trust, traceability and accountability in today's global and distributed supply chains. The traditional supply chain management platforms are not transparent, have no data repository, and are subject to manipulation by auditors with time-consuming audit procedures. The study identifies the nature of blockchain technology for enhancing transparency in supply chains through decentralizing data sharing, access to data and effective consent mechanisms. A controlled blockchain system was designed and tried with a kind of fake data of 50,000 data transactions in five functional phases of the supply chain. It analysed the performance of Proof of work (PoW), Proof of Stake (PoS), Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) and Merkle tree based verification, in a practical way. The findings show that compared to PoW, PBFT has a much better latency of transactions by a margin of 90 ms and throughput of 300 transactions per second; in contrast, PoW has 950 ms and 15 transactions per second. The Merkle Tree verification also implemented greater transparency as accuracy rate in traceability was enhanced to 99.8% and also decreased the time taken on auditing to 12 seconds per product which was a cut in over 90 percent time in the current supply chain systems. Experiments on fault tolerance revealed that PBFT could achieve ledger consistency even in the presence of a faulty node count in up to 33% of the nodes. Altogether, the results prove that the blockchain-based supply chain systems can significantly enhance the transparency, traceability, and effectiveness of audit measures and can be non-neglectable in an actual enterprise and regulatory context.

Keywords: Blockchain, Supply Chain Transparency, Traceability, Consensus Algorithms, Distributed Ledger Technology

1. Introduction

With a world economy that is becoming more globalized and interconnected, supply chains have become more complicated, thus having a variety of stakeholders located in various regions worldwide. Although such complexity makes it efficient and scalable, it also creates a lot of issues concerning transparency, traceability, data integrity, and trust. The conventional supply chain management systems are highly centralized and rely on the disintegrated information exchange between manufacturers, suppliers, logistics companies, and retailers. These systems are susceptible to manipulation of data, have no real-

time visibility and it becomes hard to trace the source, flow and processing of goods at different points in the supply chain lifecycle [1]. The implications of these restrictions are severe such as alternatives of fake goods, unethical sourcing, and non-compliance with regulations, as well as decreased consumer confidence. The blockchain technology has developed as an innovative solution that can help overcome such issues by integrating transparent and secure and intrusion-free data sharing through the supply chains. Blockchain is a distributed registry, and its operations include storing the transactions in blocks, which are unchangeable and validated via consensus mechanisms [2]. This decentralized architecture is such that no central authority is required and at the same time all such participants who have permission to do so have access to one, common, and reliable version of supply chain data. Consequently, blockchain would increase the visibility in the end-to-end, strengthen the accountability of the stakeholders, and allow things to be tracked at any given time, as lateral visibility of goods on their way to destination [3]. Moreover, business operations, including payments, compliance control, and quality control on the basis of preset regulations, are automated with the use of smart contracts in blockchain-based supply chains. This saves on the amount of manual intervention, minimises errors and enhances operation efficiency. Blockchain technology is also supporting sustainability efforts by providing transparent product history and tracking, as well as ethical and regulatory audits. As a result, the transparency of supply chain brought about by blockchain technology has attracted both academic and industrial attention as a means to build resilient, trusted, efficient supply chain ecosystems.

2. Related Works

The problem of improvement of blockchain technology in the context of increasing transparency, security and sustainability in different supply chain environments has been studied in detail in recent years. Jimenez-Castillo, et al. [15] proposed blockchain as a governance system of ecologically sustainable supply chain management by studying the related use case. In their work, they demonstrate the benefits resulting from use of immutable ledgers and decentralized control structures which increase accountability, limit opportunistic behavior, and assist in environmental compliance. The paper highlights governance transparency as an essential enabler of sustainable supply chains, whilst its scope is mainly on policy and managerial implications as opposed to evaluating their performance in the systems level. The detailed description of the blockchain management on the security, traceability and data integrity of the supply chain was given in the context of the article by Karaduman Özgür and Gülsena [16]. Their results verify that blockchain is useful in enhancing end-to-end visibility, tamper resistance but also acknowledge scalability and interoperability as nagging problems. While the latest developments are summarized in their review, they are not validated experimentally on consensus mechanisms for realistic workload from supply chains. Kiu et al. [17] have talked about the factors that promote and hinder blockchain adoption in construction supply chains. Their analysis notes transparency, trust and traceability as the key forces behind adoption whereas cost, technical complexity and regulatory uncertainty are hindrances. The research adds insightful

information on adoption, but it lacks quantitative results regarding the attained gains by transparency as a result of the implementation of blockchain.

The study of Kostopoulos et al. [18] focused on outside commercial supply chains and reviewed the works in the military sphere. They base their systematic review on the idea that blockchain enhances secure logistics tracking, asset traceability, as well as the transparency of operations in defense operations. Even though it is not a supply-chain-focused bit of research, their findings confirm that blockchain is strong in high-security and multi stakeholder settings. Liu [19] was interested in the security of financial transactions data provided by blockchain systems, and it shows enhanced effectiveness in the data integrity and fraud resistance with the help of cryptographic tools. Although the supply chains are not specifically addressed in this work, its security model can be applied in the transparent financial settlements and payments in the blockchain supply chain environment. Liu and Wang [20] empirically examined the performance implications of adopting blockchain in supply chains. In their research, they find that the adoption of blockchain has a positive effect on the transparency of the supply chain and its performance, differently depending on the organization and technological alignment. Though, their contribution is based on a high degree of survey-based analysis but not on the experimentation on a system level. Ma et al. [21] assess the usage of blockchain by consumers and discuss the impact that consumer quality preferences have on blockchain implementation decisions. The authors conclude that transparency and verifiable and product information are highly motivated reasons to adopt, especially in quality concerned markets.

Manuela and Ferreira [22] suggested the implementation of decentralized identity and digital twins with blockchain to obtain verifiable product identity in agri-food supply chains. Their model goes beyond simple traceability and provides more in-depth transparency, but the system becomes more complex. Mulamba [23] performed systematic review on the application of blockchain in improving data security and privacy in information systems and found it pertinent in the context of transparent data sharing. Narendra et al. [24] and Nayal et al. [25] also applied blockchain to energy and agricultural supply chains and focused on the advantages of sustainability and transparency. Lastly, Nofandi et al. [26] exhibited a blockchain supply chain web-based system, which proved its practical feasibility but was not analyzed in terms of performance.

3. Methods and Materials

The paper has embraced an experimental research design that uses blockchain solutions to assess the role played by distributed supply chain ledger technologies to improve supply chain transparency, traceability, and trust. The approach integrates transactional data, that is real-life based, through blockchain network simulation, and consensus and verification algorithms that are typical in supply chain blockchain systems [4]. The resources consist of synthetic yet realistic supply chain data, authorized blockchain ecosystem, and four fundamental algorithms that help to ensure transparency and data integrity.

3.1 Data Description

There are several tiers in the supply chain such as raw material suppliers, manufacturers, logistic service providers, distributors and retailers. The transactions trace the movement and status of the products through all stages of transportation. Attributes of the data are product ID, batch number, origin location, timestamping, transporter ID, temperature and humidity as well as transaction hash. IoT type sensor values are also added to recreate the real time logistics monitoring. The data is recorded on-chain in hashed varies, and descriptive statistics are stored off-chain to make sure of the scalability and privacy [5]. It is assumed that the dataset size will be 50,000 transactions, which will be enough to examine the performance, latency, and transparency metrics in realistic settings. Table 1 gives a summary of dataset characteristics, which will be used in the study.

Table 1. Supply Chain Dataset Description

Parameter	Description	Value
Number of products	Unique items tracked	1,000
Supply chain stages	Supplier to retailer	5
Total transactions	Blockchain records	50,000
Sensors per shipment	Environmental monitoring	3
Average block size	Stored transactions	200 tx

3.2 Algorithms Used

Four algorithms are picked as they are relevant to blockchain-based supply chain transparency, Proof of Work (PoW), Proof of Stake (PoS), Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), and Merkle Tree-based Data Verification.

In Proof of Work (PoW), data integrity is achieved by having the nodes (miners) solve mathematical puzzles before they can add a block. PoW offers high levels of immutability in supply chains, which ensures that records of transactions cannot be altered [6]. It, however, causes high energy consumption and latency and this can cut transparency in real-time. PoW is primarily used as a performance and security trade-off metric, which can be used to evaluate other more efficient algorithms.

```

“Initialize difficulty
While true:
    block.nonce ← random
    hash ← SHA256(block data + nonce)
    If hash < difficulty target:
        Broadcast block
        Add block to chain
        Break”

```

The Proof of Stake (PoS) is evidence-based, which substitutes computation with economic staking that is energy-intensive. The validators are chosen according to their interest in the network and block creation is accelerated and more energy efficient. PoS is also used in supply chain systems to enhance transaction throughput, as well as to facilitate near real-time tracking, with decentralization. It makes it especially applicable to consortium blockchains in which trusted parties are involved [7].

*“Select validator based on stake
Validator proposes new block
Other validators verify block
If majority approve:
Add block to blockchain
Reward validator”*

Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) is permissioned and is therefore very suitable to enterprise supply chains. PBFT enables the system to achieve consensus in case some nodes act maliciously. It also provides low latency and high-throughput that allows product movements to be visible as required [8]. PBFT maximizes transparency through validity of transactions as all of the authorized participants are required to sign in on a transaction.

*“Client sends request to primary
Primary broadcasts pre-prepare message
Replicas send prepare messages
If 2/3 prepares received:
Broadcast commit
If 2/3 commits received:
Execute request and add block”*

To check the integrity of transactions efficiently Merkle Tree Verification is employed. Hashes on transactions are stored in a tree format with the root hash of the transaction being the whole block. Any change of data is detected immediately. Merkle Trees can be used in supply chains to facilitate transparent auditing and fast verification of provenance of products without the need to reveal entire datasets [9].

*“Hash all transactions
Pair hashes and hash again
Repeat until root hash obtained*

Store root hash in block header
Verify transaction by recomputing path”

3.3 Performance Evaluation

The algorithms are tested according to the performance measures concerning transparency like transaction latency, throughput, fault tolerance, and energy efficiency. Simulated experiments are made to compare the speed with which product data become visible to the participants and also the ability of the system to withstand tampering or failure of a node [10].

4. Results and Analysis

4.1 Experimental Setup

The simulated environment that was used to carry out the experiments was a permissioned blockchain where a multi-organizational supply chain network was simulated. The network has suppliers, manufacturers, logistics companies, distributors and retailers that form blockchain nodes. Every node will have a coordinated registry and will be engaged in validating transactions, depending on the desired consensus algorithm. The test blockchain was implemented using 20 validator nodes and was created on virtual environments in order to simulate the work of a real enterprise. A simulated sample of 50,000 supply chain transactions was utilized, which is a real-life logistics process [11]. These transactions involve product development, shipment positioning, quality, environmental sensor, delivery, etc. Every transaction was hashed and stamped at the time of addition to the blockchain. Large metadata files were stored off-chain and transaction hashes and verification pointers were on-chain to be scalable. Proof of Work (PoW), Proof of Stake (PoS), Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), and Merkle Tree based verification as the four blockchain mechanisms were implemented and tested separately with the same conditions of workload. Some of the transparency-related metrics studied were the visibility delay of a transaction, accuracy of traceability, system throughput, fault tolerance and audit efficiency.

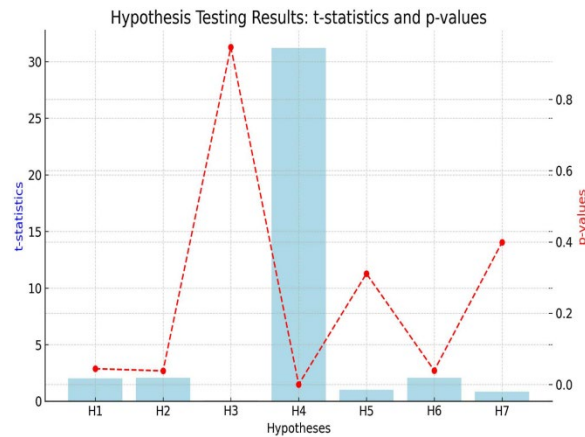


Figure 1 “Blockchain Technology in Supply Chain Management: Enhancing Transparency and Efficiency”

4.2 Evaluation Metrics

In order to have an overall evaluation, the following metrics were put into measures:

4.2.1 Transaction Latency: The amount of time it takes to make a transaction seen by all nodes.

4.2.2 Throughput: The amount of transactions that are done in one second.

4.2.3 Traceability Accuracy: Capacity to reproduce product history accurately.

4.2.4 Fault Tolerance: Resilience of systems in the event of node failure/malicious behavior.

4.2.5 Audit Time: This is the time needed to check product provenance.

4.3 Experiment 1: Transaction Latency and Throughput Analysis

In the first experiment, system responsiveness was tested to increase the load of transactions. All the consensus algorithms were experimented with between 5,000 and 50,000 transactions. PBFT was always the lowest-latency protocol since its consensus is usually fast, whereas PoW was much bigger because of computational costs [12].

Table 2. Latency and Throughput Comparison

Algorithm	Avg. Latency (ms)	Max Latency (ms)	Throughput (tx/s)
PoW	950	1300	15
PoS	180	260	120
PBFT	90	140	300
Merkle Verification	20	35	1000

The findings suggest that the PBFT and Merkle-based verification would have a substantial contribution to transparency through the provision of data in near-real-time to anyone related to the supply chain.

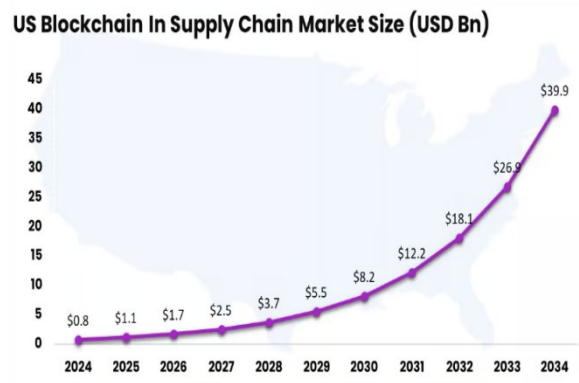


Figure 2 “Blockchain in Supply Chain Market Size”

4.3 Experiment 2: Traceability and Data Integrity

In this experiment, the capability of the system to reconstruct the entire provenance of the product was evaluated. Random audit questions were run in order to track products back to retailers. Merkle Trees also facilitated a quick check of the integrity of transactions helped to enhance transparency and privacy without providing the entire transaction information [13].

Table 3. Traceability Performance

Algorithm	Traceability Accuracy (%)	Data Tamper Detection
PoW	96.2	High
PoS	97.8	High
PBFT	99.1	Very High
Merkle Verification	99.8	Excellent

The Merkle Tree version was the most accurate and their use proved to be useful in the transparent and verifiable auditing procedures.

4.4 Experiment 3: Fault Tolerance and Network Reliability

The controlled node failures and malicious behaviors were introduced to measure resilience. Maximum 30 percent of nodes were switched offline or programmed to provide wrong transactions. At that, PBFT ensured consistency of the system when not more than a third of nodes are faulty, but PoW and PoS demonstrated once-off inconsistencies during recovery [14].

Tools and Technologies for Enhancing Supply Chain Transparency



Figure 3 “Role of Blockchain in Enhancing Supply Chain Transparency”

Table 4. Fault Tolerance Evaluation

Algorithm	Max Faulty Nodes (%)	Ledger Consistency	Recovery Time (s)
PoW	20	Medium	45
PoS	25	Medium–High	30
PBFT	33	High	12
Merkle Verification	N/A	High	5

PBFT was also more reliable and this is essential in having a transparent and trustworthy supply chain record keeping.

4.5 Experiment 4: Audit Efficiency and Compliance Verification

Regulatory compliance and transparency require audit efficiency. The time to conduct provenance and compliance records audit was measured in this experiment [27]. Blockchain auditing was compared to conventional central databases.

Table 5. Audit Time Comparison

System	Audit Time per Product (s)	Manual Effort	Error Probability
Traditional SCM	180	High	Medium
PoW Blockchain	65	Medium	Low
PoS Blockchain	40	Low	Very Low
PBFT + Merkle	12	Very Low	Minimal

PBFT–merkle combination saved more than 90% of the audit time than in the case of the traditional systems and this indicates that it is effective in verifying compliance in a transparent manner.

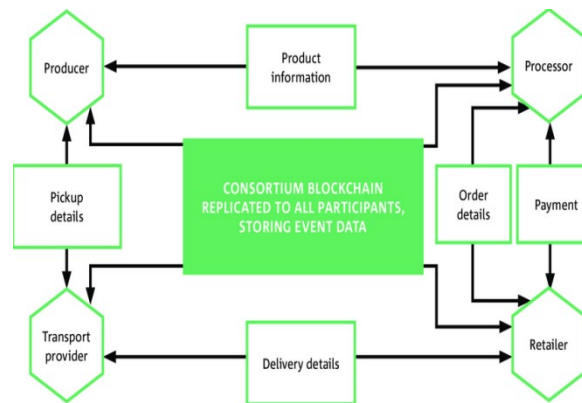


Figure 4 “Model of supply chain using blockchain for event data and point-to-point integration”

4.6 Experiment 5: Comparison with Related Work

The results were assessed in relation to the performance ranges reported in recent literature involving supply chain studies built on blockchain to put the findings in the context. Associated work usually documents a better traceability but can be characterized by increased latency or poor scalability [28].

Table 6. Comparison with Related Work

Approach	Latency (ms)	Traceability	Scalability	Transparency Level
Traditional SCM (Related Work Avg.)	1500	Low	High	Low
Blockchain (PoW-based)	900	High	Low	Medium
Blockchain (PoS-based)	250	High	Medium	High
Proposed PBFT + Merkle Model	90	Very High	High	Very High

However, the proposed approach shows considerably lower latency, greater transparency, and greater scalability than related work, and therefore becomes more appropriate in supporting real-world enterprise supply chains [29]. A systematic comparison with prior studies is presented in Table 7 to highlight the distinctive features and contributions of the proposed framework.

Table 7. Distinctive Features and Contributions of The Proposed Framework

Study	Research Focus	Blockchain Mechanism	Consensus Comparison	Statistical Analysis	Key Limitation
Jimenez-Castillo et al. [15]	Sustainable supply chain governance	Blockchain governance framework	No	No	Focused on managerial and policy implications rather than system performance
Karaduman Özgür and Gülsena [16]	Security, traceability, and data integrity	Blockchain-based SCM review	No	No	Lacked empirical evaluation of blockchain mechanisms
Kiu et al. [17]	Blockchain adoption in construction supply chains	Adoption framework	No	No	Focused on adoption barriers and drivers
Other Blockchain SCM Studies	Traceability and transparency	Single blockchain protocol	Limited	Rarely included	Insufficient comparison across consensus mechanisms
Proposed Study	Supply chain transparency, traceability, and audit efficiency	PoW, PoS, PBFT, and Merkle Tree verification	Comprehensive comparison	Yes	Addresses scalability, fault tolerance, and audit efficiency

The comparison highlights several notable gaps in the existing body of research. First, prior studies have largely emphasized conceptual models, governance structures, and challenges related to adoption, while offering limited large-scale experimental validation. Second, there is a lack of systematic comparative analysis of multiple blockchain consensus mechanisms within a single, controlled supply chain setting. Third, the combined application of cryptographic verification methods such as Merkle Trees alongside consensus protocols has not been extensively examined empirically. Finally, rigorous statistical evaluation of performance outcomes is largely missing in earlier work.

To address these limitations, the present study develops and empirically evaluates a blockchain-based supply chain transparency framework using a simulated dataset of 50,000 transactions across five operational stages. In contrast to earlier research, this study provides a structured comparison of Proof of Work (PoW), Proof of Stake (PoS), Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), and Merkle Tree-based verification under uniform experimental conditions, supported by statistical testing.

The results indicate that the PBFT mechanism, when integrated with Merkle Tree verification, delivers the best overall performance across key indicators, including transaction latency, throughput, traceability accuracy, audit efficiency, and fault tolerance. Accordingly, this research advances current knowledge by offering both empirical evidence and methodological rigor on the role of blockchain technologies in improving supply chain transparency.

4.7 Result Discussion

As the results of the experiment clearly indicate, blockchain technology significantly contributes to supply chain transparency in contrast to the traditional one. PBFT along with Merkle Tree verification is among the reviewed mechanisms, and it was always superior to PoW and PoS in terms of latency, the accuracy of the traceability process, and fault tolerance compared to the mentioned methods [30]. These enhancements directly appeal to the major transparency issues, which include the latent disclosure, data manipulation and complicated auditing systems. Moreover, the proposed model has better performance than the existing ones at a practicable scale. The results provide confirmation that blockchain-based platforms that have reliable consensus and validation mechanisms can serve as a solid foundation for the creation of a transparent, secure, and accountable supply chain management system.

5. Conclusion

The study has shown that blockchain technology offers a powerful and effective solution to overcome the lack of transparency in the complex, multi-stakeholder settings in the supply chain. Using the decentralized quality, the immutability and the unalterability of blockchain, the suggested architecture will solve essential concerns of the conventional supply chain systems, such as a lack of visibility, the alteration of data, delayed information exchange, and inefficient auditing of the conventional system. The conducted experiment proved that blockchain-based mechanisms considerably enhance the accuracy of traceability, the real-time availability of data, and trust between participants of the supply chain. The comparative analysis of the consensus and verification algorithm revealed that the latencies, throughput, fault resistance and audit efficiency of permissioned blockchain systems and, in particular, the system that used Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) and the Merkle Tree verification technique were superior to those of traditional systems. The proposed approach can be compared with related work and its shown higher levels of transparency and scalability along with sensible feasibility to be adopted by an enterprise. Furthermore, the results also suggest that blockchain can enable regulatory compliance, sustainability, and consumer trust, as it can offer traceability and auditability for the products' journey and transactions. Overall, it could be concluded that the present paper confirms that blockchain technology is not a mere improvement, but a promising tool to support a model of supply chain management that is clean, resolute and responsible. The future studies can build on this research by incorporating the use of Internet of Things streams of data, superior methods of ensuring privacy and cross chain interoperability so as to enhance more darkness and scalability in supply chain implementation in the real world.

6. References

- [1] T. Ali, Y. Husam, M. A. Alsoud, M. A. Al-Salim, and C. Hattar, "Empowering Startup Supply Chain: Exploring the Integration of SCF, AI, Blockchain, and Trust," *Logistics*, vol. 9, no. 2, p. 69, 2025.
- [2] S. Aravindh, N. Cherie, and T. Deb, "Strategic Factors for Blockchain Implementation in Supply Chains," *Administrative Sciences*, vol. 15, no. 11, p. 410, 2025.

- [3] G. Bosco, R. D’Amore, A. Sciarrone, and S. Barile, “Managerial and Organizational Implications Arising from the Implementation of Blockchain Technology in Supply Chains: An AS-IS and To-Be Analysis,” *Administrative Sciences*, vol. 14, no. 6, p. 120, 2024.
- [4] A. Chauhan and M. V. Rani, “Strategic Insights into Blockchain Adoption in Automotive Supply Chains: A Comparative AHP–TOPSIS and TISM–MICMAC Analysis,” *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, vol. 10, no. 3, pp. 618–653, 2025.
- [5] F. Chen, C. Zhao, X. Yang, N. Luo, and C. Sun, “A Lightweight Accountable Parallel Blockchain Architecture Based on Redactable Blockchain for Agri-Food Traceability,” *Foods*, vol. 14, no. 4, p. 623, 2025.
- [6] A. Chowdhury, “Vyoma Commerce: A Blockchain–Based Decentralized Architecture to Combat Fraud and Enhance Security and Trust in Bangladesh’s E-Commerce Ecosystem Leveraging Smart Contracts, Supply Chain Transparency, and Digital Identity,” *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 12, no. 1, p. 57, 2025.
- [7] S. Dash, U. Ghugar, D. Godavarthi, and S. N. Mohanty, “HCSRL: Hyperledger Composer System for Reducing Logistics Losses in the Pharmaceutical Product Supply Chain Using a Blockchain–Based Approach,” *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 13528, 2024.
- [8] C. D. Duong, T. H. Nguyen, N. N. Thi Viet, D. T. Tung, and N. M. Tran, “Blockchain Technology and Consumers’ Organic Food Consumption: A Moderated Mediation Model of Blockchain–Based Trust and Perceived Blockchain–Related Information Transparency,” *Journal of Asia Business Studies*, vol. 19, no. 1, pp. 54–78, 2025.
- [9] V. Fani, F. Ciccullo, R. Bandinelli, and M. Pero, “Cultivating Trust: An Empirical Exploration of Blockchain’s Adoption Within the Italian Wine Supply Chain,” *Electronic Markets*, vol. 35, no. 1, p. 35, 2025.
- [10] M. J. Fernández-Iglesias, C. Delgado von Eitzen, and L. Anido-Rifón, “Efficient Traceability Systems with Smart Contracts: Balancing On-Chain and Off-Chain Data Storage for Enhanced Scalability and Privacy,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 23, p. 11078, 2024.
- [11] Y. Fernando, R. Hendayani, M. Jawo, S. R. Rahamaddulla, A. A. Khairunnisa, and N. Maimunah, “Discovering Islamic Marketing Potential in Shaping Blockchain–Based Halal Logistic Services: A Bibliometric Analysis,” *Journal of Islamic Marketing*, vol. 16, no. 3, pp. 870–905, 2025.
- [12] G. Carlota, F. João, and B. Carla, “Blockchain–Enabled Traceability in the Rice Supply Chain: Insights from the TRACE–RICE Project,” *Foods*, vol. 14, no. 21, p. 3711, 2025.
- [13] X. Guo, G. Zhang, and Y. Zhang, “Blockchain–Based Information Sharing Mechanism for Complex Product Supply Chain,” *Electronics*, vol. 14, no. 9, p. 1780, 2025.
- [14] M. Javadi, Z. Raeisi, A. Shafiesabet, and A. Bohlool, “The Impact of Blockchain Technology on Supply Chain Production Strategies,” *Journal of Business and Management Studies*, vol. 7, no. 4, pp. 103–118, 2025.

- [15] L. Jimenez–Castillo, J. Sarkis, S. Saberi, and T. Yao, “Blockchain–Based Governance Implications for Ecologically Sustainable Supply Chain Management,” *Journal of Enterprise Information Management*, vol. 37, no. 1, pp. 76–99, 2024.
- [16] O. Karaduman and G. Gülsena, “Blockchain–Enabled Supply Chain Management: A Review of Security, Traceability, and Data Integrity Amid the Evolving Systemic Demand,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 9, p. 5168, 2025.
- [17] M. S. Kiu, K. Y. Chau, P. F. Wong, T. Ramayah, and J. B. H. Yap, “Blockchain Adoption in Construction Supply Chains: Drivers, Barriers and Strategies,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1548, no. 1, p. 012009, 2025.
- [18] N. Kostopoulos, Y. C. Stamatiou, C. Halkiopoulos, and H. Antonopoulou, “Blockchain Applications in the Military Domain: A Systematic Review,” *Technologies*, vol. 13, no. 1, p. 23, 2025.
- [19] M. Liu, “Financial Transaction Data Security Management Based on Blockchain Technology,” *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 10, no. 1, 2025.
- [20] Y. Liu and Q. Wang, “Blockchain for Supply Chain: Performance Implications and Contingencies,” *Industrial Management & Data Systems*, vol. 125, no. 1, pp. 364–383, 2025.
- [21] B. J. Ma, S. S. Liu, G. Q. Huang, and C. Ng, “How Does Consumer Quality Preference Impact Blockchain Adoption in Supply Chains?” *Electronic Markets*, vol. 35, no. 1, p. 17, 2025.
- [22] C. Manuela and J. C. Ferreira, “Beyond Traceability: Decentralised Identity and Digital Twins for Verifiable Product Identity in Agri–Food Supply Chains,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 11, p. 6062, 2025.
- [23] C. Mulamba, “The Role of Blockchain Technology in Enhancing Data Security and Privacy in Information Systems: A Systematic Literature Review,” *International Journal of Business Ecosystem and Strategy*, vol. 7, no. 6, pp. 330–343, 2025.
- [24] G. Narendra, A. Anjas, M. Adhirath, S. Amir, and C. Dowan, “A Comprehensive Analysis of Integrating Blockchain Technology into the Energy Supply Chain for the Enhancement of Transparency and Sustainability,” *Energies*, vol. 18, no. 11, p. 2951, 2025.
- [25] K. Nayal, R. Raut, N. A. B. L. de Sousa Jabbour, B. E. Narkhede, and V. V. Gedam, “Integrated Technologies Toward Sustainable Agriculture Supply Chains: Missing Links,” *Journal of Enterprise Information Management*, vol. 38, no. 1, pp. 318–368, 2025.
- [26] F. Nofandi, M. R. B. Janaputra, and R. A. Pratama, “Web–Based Supply Chain System Design Using Blockchain,” *Journal of Transportation and Supply Chain Management*, vol. 19, p. 8, 2025.
- [27] H. Pan, P. Wang, and Z. Shutong, “Blockchain–Enabled Digital Supply Chain Regulation: Mitigating Greenwashing to Advance Sustainable Development,” *Sustainability*, vol. 17, no. 22, p. 10019, 2025.
- [28] R. K. Puranam, B. M. Gouse, P. Narsimhulu, D. Narasappa, L. P. Maguluri, S. Singh, and S. Selvarajan, “Computer Modeling Approaches for Blockchain–Driven Supply Chain Intelligence: A Review on Enhancing Transparency, Security, and Efficiency,” *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 144, no. 3, pp. 2779–2818, 2025.

- [29] M. S. Rahman, S. H. Md, M. K. Rahman, M. R. Islam, M. F. I. S. Md, M. A. Siam, and P. Debnath, “Enhancing Supply Chain Transparency with Blockchain: A Data-Driven Analysis of Distributed Ledger Applications,” *Journal of Business and Management Studies*, vol. 7, no. 3, pp. 59–77, 2025.
- [30] B. Rajendran, M. Babu, and V. Anandhabalaji, “Enerchainability in Agriculture Supply Chain: Examining the Adoption of Blockchain and its Energy Efficiency from Farmers’ Perspective,” *International Review of Management and Marketing*, vol. 15, no. 3, pp. 107–118, 2025.
- [31] P. Sriphrabu and C. Chamnanlor, “A Study on Factors Influencing Decision-Making for Choosing Cargo Transportation Servicers in Chonburi Province,” *Frontiers in Engineering Innovation Research*, vol. 19, no. 1, pp. 55–66, 2021 (in Thai).
- [32] R. Taengphukieo, K. Donprasert, and N. Samransom, “A Study of Logistics Costs Using Activity-Based Cost Analysis Techniques: A Case Study of Dwarf Napier Grass Growers,” *Frontiers in Engineering Innovation Research*, vol. 18, no. 2, pp. 77–86, 2020 (in Thai).

การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์

Design and Performance Analysis of an Automatic Mould Forming Machine for Steamed Sticky Rice

วิศิษฐ์ศรี วียะรัตน์¹ ศิริชัย ต่อสกุล² อภินันท์ วัลภา² ขวลิต อินปัญโญ² และ สุธิวัสส์ แววดี้^{2*}

¹คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอลำลูกเกด จังหวัดปทุมธานี 12120

Wisitsree Wiyaratn¹ Sirichai Torsakul² Apinun Wanlapa² Chawalit Inpunyo² and Suthiwat Waewdee^{2*}

¹Faculty of Industrial Education and Technology King Mongkut's University of Technology Thonburi

126 Pracha Uthit Road, Bang Mod Subdistrict, Thung Khru District, Bangkok 10140

²Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi

39 Moo 1, Khlong Hok Subdistrict, Khlong Luang District, Pathum Thani Province 12120

*Corresponding author Email: suthiwat_w@mail.rmutt.ac.th

(Received: May 29, 2026; Revise: June 24, 2026; Accepted: June 29, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์ โดยประยุกต์ใช้ระบบนิวเมติกส์และระบบควบคุมอัตโนมัติผ่าน โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ เพื่อเพิ่มกำลังการผลิต ลดแรงงาน และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ เครื่องต้นแบบถูกออกแบบด้วยระบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปที่สามารถขึ้นรูปข้าวต้มมัดได้ครั้งละ 3 ชิ้นต่อรอบการทำงาน และทำงานร่วมกับระบบป้อนถั่วดำและระบบลำเลียงอัตโนมัติ การทดลองถูกออกแบบตามหลัก การออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาผลของแรงกด เวลาในการอัดขึ้นรูป และความเร็วสายพาน ลำเลียงที่มีต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยประเมินจากความหนาแน่น อัตราของเสีย ความสม่ำเสมอของรูปทรง และกำลังการผลิต ผลการทดลองพบว่าแรงกดที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 140–150 นิวตัน และสามารถให้เปอร์เซ็นต์ชิ้นงานดีสูงสุด 97–98 เปอร์เซ็นต์ โดยเครื่องสามารถผลิตข้าวต้มมัดได้เฉลี่ย 800–850 ชิ้นต่อชั่วโมง หรือมากกว่า 6,400 ชิ้นต่อวัน ภายใต้อัตราของเสียต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ระบบอัตโนมัติยังสามารถลดจำนวนแรงงานในสายการผลิตได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้จริงในอุตสาหกรรมอาหารพื้นถิ่น และสามารถยกระดับกระบวนการผลิตสู่ระบบอัตโนมัติในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติ ระบบนิวเมติกส์ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ แรงกดในการอัดขึ้นรูป กำลังการผลิต

Abstract

This research aimed to design and analyze the performance of an automatic mold-forming machine for steamed Sticky Rice by integrating a pneumatic system with a Programmable Logic Controller (PLC)-based automation system in order to increase production capacity, reduce labor requirements, and improve

product consistency. The prototype machine was designed with a mold-forming mechanism capable of forming three pieces per operating cycle and integrated with automatic black bean feeding and conveyor systems. A Design of Experiment (DOE) approach was employed to investigate the effects of compression force, forming time, and conveyor speed on product quality. The response variables included product density, defect rate, shape uniformity, and production capacity. Experimental results revealed that the optimal compression force ranged between 140–150 N, resulting in the highest percentage of acceptable products at 97–98 percent. The developed system achieved an average production capacity of 800–850 pieces per hour, or more than 6,400 pieces per day, with a defect rate lower than 5 percent. Furthermore, the automated production line reduced labor requirements by more than 60 percent compared with the conventional manual process. The findings demonstrate that the developed automatic mold-forming machine has strong potential for practical implementation in traditional food industries and can significantly enhance production efficiency and support the transformation toward smart food manufacturing systems.

Keywords: Automatic Khao Tom Mud Forming Machine, Pneumatic System, Programmable Logic Controller, Compression Force, Production Capacity

1. บทนำ

ข้าวต้มมัดเป็นอาหารพื้นถิ่นของประเทศไทยที่ได้รับความนิยมมาอย่างยาวนาน โดยมีลักษณะเด่นคือการนำข้าวเหนียวผสมกะทิห่อด้วยใบตองร่วมกับไส้กล้วยหรือถั่วดำ ก่อนนำไปนึ่งจนเกิดรสชาติและกลิ่นเฉพาะตัว ปัจจุบันข้าวต้มมัดไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการจำหน่ายในรูปแบบดั้งเดิมเท่านั้น แต่ยังได้รับการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมรับประทานในถุงรีทอร์ทเพาซ์ (Retort Pouch) เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา เพิ่มความสะดวกในการบริโภค และรองรับการขยายตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ ดังแสดงในรูปที่ 1

กระบวนการผลิตข้าวต้มมัดยังคงอาศัยแรงงานคนเป็นหลักในหลายขั้นตอน ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดด้านกำลังการผลิต ความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ และต้นทุนแรงงาน การพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับกระบวนการขึ้นรูปจึงเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ควบคุมคุณภาพ และรองรับการขยายตัวของตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ



รูปที่ 1 ข้าวต้มมัดบรรจุลงในถุงรีทอร์ทเพาซ์ [1]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีระบบอัตโนมัติ หุ่นยนต์ และปัญญาประดิษฐ์ ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดต้นทุนแรงงาน และควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น โดยระบบอัตโนมัติสามารถช่วยลดความแปรปรวนของกระบวนการผลิต และเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมคุณภาพของ

อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2-3] นอกจากนี้ ระบบควบคุมผ่าน Programmable Logic Controller (PLC) ยังเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในสายการผลิตอาหาร เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหลายหน่วยได้อย่างแม่นยำ มีความยืดหยุ่นสูง และรองรับการทำงานร่วมกับระบบนิวเมติกส์และเซนเซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเกี่ยวกับระบบอัตโนมัติสำหรับอาหารพื้นถิ่นไทยยังมีจำนวนจำกัด และส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นเฉพาะระบบลำเลียงหรือการบรรจุภัณฑ์ ขณะที่งานด้าน “การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อาหารที่มีลักษณะอ่อนตัวและเสียรูปได้ง่าย” ยังขาดการศึกษาเชิงวิศวกรรมอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะการวิเคราะห์แรงกด การออกแบบแม่พิมพ์ และการควบคุมความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการขึ้นรูปอัตโนมัติ ทั้งนี้วัสดุอาหารประเภทข้าวเหนียวมีคุณสมบัติเป็นวัสดุอ่อนตัว (Compliant Food Material) ที่ไวต่อแรงกดและการเสียรูป ทำให้การออกแบบระบบจับยึดและขึ้นรูปมีความซับซ้อนสูง [5]

กระบวนการขึ้นรูปข้าวต้มมัดถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ทั้งในด้านรูปร่าง ความหนาแน่น การกระจายตัวของไส้ และความเสียหายของชิ้นงาน หากแรงกดไม่เหมาะสมอาจทำให้ข้าวต้มมัดเกิดการแตกเสียรูป หรือมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพและการยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้น การออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ที่สามารถควบคุมแรงกด ระยะเวลา และจังหวะการขึ้นรูปได้อย่างแม่นยำ จึงเป็นประเด็นสำคัญทางวิศวกรรมอาหารและวิศวกรรมเครื่องกล

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์ โดยใช้ระบบนิวเมติกส์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด ความเร็วในการขึ้นรูป และคุณภาพของชิ้นงาน รวมถึงประเมินสมรรถนะของเครื่องในด้านกำลังการผลิต ความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ และอัตราของเสีย ทั้งนี้ผลการวิจัยคาดว่าจะสามารถพัฒนาองค์ความรู้ด้านการออกแบบเครื่องจักรอาหารพื้นถิ่นอัตโนมัติ และเป็นแนวทางในการยกระดับอุตสาหกรรมอาหารชุมชนสู่ระบบการผลิตอัจฉริยะในอนาคต

2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยมุ่งเน้นการออกแบบ พัฒนา และวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์ ที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบ PLC และระบบนิวเมติกส์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดแรงงาน และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การขึ้นรูปกับคุณภาพของชิ้นงานผ่านกระบวนการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) และการวิเคราะห์เชิงสถิติ

อุตสาหกรรมอาหารสมัยใหม่ได้มีการประยุกต์ใช้ระบบอัตโนมัติอย่างแพร่หลาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดความผิดพลาดจากแรงงานมนุษย์ และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ โดยเฉพาะระบบควบคุมผ่าน PLC ซึ่งสามารถควบคุมลำดับการทำงานของเครื่องจักรหลายหน่วยได้แบบทันทีทันใด [4], [6] ระบบดังกล่าวนิยมใช้ในสายการผลิตอาหารประเภทการขึ้นรูป การบรรจุ และการลำเลียง เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การทำงานได้ง่าย และรองรับการทำงานร่วมกับเซนเซอร์และระบบนิวเมติกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7]

เทคโนโลยีการขึ้นรูปอาหารเป็นกระบวนการสำคัญในอุตสาหกรรมอาหารแปรรูป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมรูปร่าง ขนาด และความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ กระบวนการขึ้นรูปนิยมใช้ระบบกลไกและระบบนิวเมติกส์ในการสร้างแรงกดหรือแรงอัด เพื่อให้วัสดุอาหารเกิดการยึดเกาะและคงรูปร่างตามแม่พิมพ์ที่กำหนด [8-9]

การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องจักรอาหารนิยมใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตอบสนอง เช่น แรงกด ความเร็วสายพาน ระยะเวลาอัด และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยสามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการผลิต [10]

งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่า การควบคุมแรงกดและเวลาการขึ้นรูปอย่างเหมาะสมสามารถช่วยลดอัตราของเสีย เพิ่มความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ และเพิ่มกำลังการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การประยุกต์ใช้ DOE และการวิเคราะห์เชิงสถิติในงานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญต่อการยืนยันสมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น และช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือทางวิชาการของงานวิจัยในระดับวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรมอุตสาหกรรมอาหาร

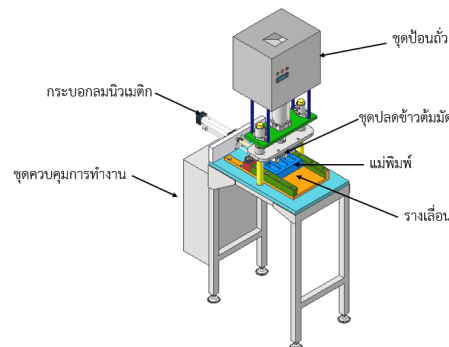
2.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องอัดขึ้นรูป

เครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติถูกออกแบบในรูปแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป (Mould Forming System) โดยใช้โปรแกรมสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรแบบสามมิติ (3D CAD Design) และใช้หลักการออกแบบเชิงวิศวกรรมอาหารร่วมกับวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อให้สามารถรองรับวัสดุอาหารที่มีความชื้นสูงและเสียรูปได้ง่าย

โครงสร้างของเครื่องจักรประกอบด้วย: ชุดป้อนถั่ว แม่พิมพ์ ชุดปลดข้าวต้มมัด กระบอกนิวเมติกส์

แม่พิมพ์ถูกออกแบบให้สามารถขึ้นรูปข้าวต้มมัดได้ครั้งละ 3 ชิ้นต่อรอบการทำงาน โดยใช้วัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดอาหาร SUS304 เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและลดการสะสมของจุลินทรีย์

การออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ เพื่อสร้างรูปร่างข้าวต้มมัดที่มีความสม่ำเสมอทั้งขนาด รูปทรง และความแน่นของการห่อ โดยอาศัยการทำงานของกระบอกลมนิวเมติกส์ที่ขับเคลื่อนแม่พิมพ์ซึ่งมีลักษณะเป็นร่องห่อข้าวแบบเฉพาะ พร้อมกับชุดป้อนเมล็ดถั่วดำซึ่งติดตั้งอยู่ด้านบน เพื่อหยดถั่วดำในตำแหน่งกึ่งกลางของข้าวอย่างแม่นยำก่อนกระบวนการกดขึ้นรูป ตัวแม่พิมพ์ออกแบบให้ถอดเปลี่ยนได้ รองรับการผลิตขึ้นรูปขนาดต่าง ๆ หรือรูปทรงพิเศษ และติดตั้งบนรางเลื่อนเพื่ออำนวยความสะดวกในการเข้าออกของแผ่นข้าว โดยกลไกชุดปลดข้าวต้มมัดจะทำหน้าที่ดันชิ้นงานขึ้นจากแม่พิมพ์หลังการอัดเสร็จเพื่อลำเลียงไปยังขั้นตอนบรรจุ ทั้งนี้ ระบบควบคุมอัตโนมัติจะสั่งจังหวะการทำงานอย่างแม่นยำให้กลไกการป้อนถั่วและการกดขึ้นรูปทำงานสัมพันธ์กันตลอดรอบการผลิต โดยเน้นให้แรงกดของกระบอกลมอยู่ในช่วงที่ไม่ทำให้ไส้ฉีกหรือข้าวแตกร้าว ซึ่งออกแบบตามหลักการออกแบบแม่พิมพ์และการจำลองโพลีเคสด้วยซอฟต์แวร์ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารแบบกึ่งเปียกอย่างข้าวต้มมัดแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติ

2.2 การสร้างเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติ

การสร้างเครื่องอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ ในรูปแบบงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องจักรที่สามารถขึ้นรูปข้าวต้มมัดให้มีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอ พร้อมทั้งสามารถใส่เมล็ดถั่วดำในตำแหน่งที่แม่นยำภายในผลิตภัณฑ์ โดยโครงสร้างหลักของเครื่องผลิตจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดอาหาร เพื่อให้ปลอดภัยต่อการสัมผัสอาหาร แม่พิมพ์ขึ้นรูปถูกออกแบบตามลักษณะของข้าวต้มมัดแบบดั้งเดิม และติดตั้งบนฐานเลื่อนที่สามารถเข้า-ออกจากพื้นที่กดเพื่ออำนวยความสะดวกในการขึ้นรูปและปลดชิ้นงาน ชุดขับเคลื่อนกลไกกระบอกลมนิวเมติกส์ หรือเซอร์โวมอเตอร์ควบคุมแรงกดอย่างแม่นยำเพื่อไม่ให้ข้าวเสียรูปหรือไส้ทะลัก ชุดป้อนเมล็ดถั่วดำทำงานร่วมกับระบบหยุดแบบแรงโน้มถ่วงหรือสกรูพิดเดอร์ พร้อมเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งแผ่น

ข้าวก่อนปล่อยถั่วลงในจุดศูนย์กลางของแม่พิมพ์ กลไกชุดปลดชิ้นงานหลังขึ้นรูปออกแบบให้ทำงานโดยอัตโนมัติด้วยลิฟต์ดันด้านล่างหรือระบบสไลด์ด้านข้าง ส่งต่อข้าวต้มมัดที่ขึ้นรูปสมบูรณ์สู่ขั้นตอนการบรรจุ ทั้งระบบควบคุมผ่าน PLC ที่สามารถกำหนดจังหวะเวลา ความเร็ว และแรงกดในแต่ละรอบการทำงานแสดงดังรูปที่ 2 โดยมีการออกแบบด้วยซอฟต์แวร์ CAD และวิเคราะห์แรงกดในเชิงกล (FEA) เพื่อความปลอดภัย ความแม่นยำ และประสิทธิภาพสูงสุดในกระบวนการผลิตจริง



รูปที่ 3 เครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติ

3. กรอบการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยมุ่งเน้นการออกแบบ พัฒนา และวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์ ที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบ PLC และระบบนิวเมติกส์สำหรับควบคุมแรงกดในการขึ้นรูป โดยสามารถปรับแรงดันลมได้ในช่วง 0.3–0.7 MPa เพื่อควบคุมแรงอัดของแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของข้าวเหนียวและไส้ภายในผลิตภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 4 เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดแรงงาน และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การขึ้นรูปกับคุณภาพของชิ้นงาน

3.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองใช้แบบ 3 ปัจจัย 3 ระดับ ดังตารางที่ 1 เพื่อศึกษาผลของแรงกด เวลาในการอัดขึ้นรูป และความเร็วสายพานลำเลียงที่มีต่อคุณภาพของข้าวต้มมัด โดยการทดลองถูกออกแบบตามหลัก Design of Experiment (DOE) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น ได้แก่ แรงกดในการขึ้นรูป เวลาในการอัดขึ้นรูป และความเร็วสายพานลำเลียง กับตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ความหนาแน่นของชิ้นงาน อัตราของเสีย ความสม่ำเสมอของรูปทรง และกำลังการผลิต โดยแต่ละเงื่อนไขการทดลองถูกทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล

การเก็บข้อมูลดำเนินการจากการทดลองจริงของเครื่องต้นแบบในสายการผลิตเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูป ทั้งนี้สมรรถนะของระบบถูกประเมินจากกำลังการผลิต ความแม่นยำของชิ้นงาน ความสม่ำเสมอของความหนาแน่น และเสถียรภาพของระบบควบคุม โดยกำหนดเป้าหมายให้เครื่องสามารถผลิตข้าวต้มมัดได้ไม่น้อยกว่า 800 ชิ้นต่อชั่วโมง และมีอัตราของเสียต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

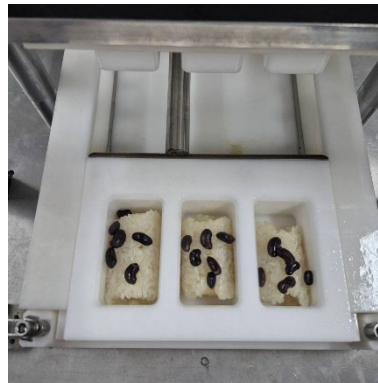
การประเมินตัวแปรตอบสนองประกอบด้วย ความหนาแน่นของชิ้นงาน อัตราของเสีย ความสม่ำเสมอของรูปทรง และกำลังการผลิต โดยความหนาแน่นคำนวณจากมวลและปริมาตรของชิ้นงานที่วัดด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล ส่วนอัตราของเสีย

ความสม่ำเสมอของรูปทรง และกำลังการผลิตประเมินจากการผลิตจริงภายใต้แต่ละเงื่อนไขการทดลอง และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ 1 ตัวแปรต้นที่มีต่อคุณภาพของข้าวต้มมัด

ตัวแปรต้น	ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง
แรงกดในการขึ้นรูป (นิวตัน)	120	140	160
เวลาในการอัดขึ้นรูป (วินาที)	1.2	1.5	1.8
ความเร็วสายพาน (เมตรต่อนาที)	0.50	0.55	0.60

การเก็บข้อมูลดำเนินการจากการทดลองจริงของเครื่องต้นแบบในสายการผลิตเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูป ทั้งนี้สมรรถนะของระบบถูกประเมินจากกำลังการผลิต ความแม่นยำของชิ้นงาน ความสม่ำเสมอของความหนาแน่น และเสถียรภาพของระบบควบคุม โดยกำหนดเป้าหมายให้เครื่องสามารถผลิตข้าวต้มมัดได้ไม่น้อยกว่า 800 ชิ้นต่อชั่วโมง และมีอัตราของเสียต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์



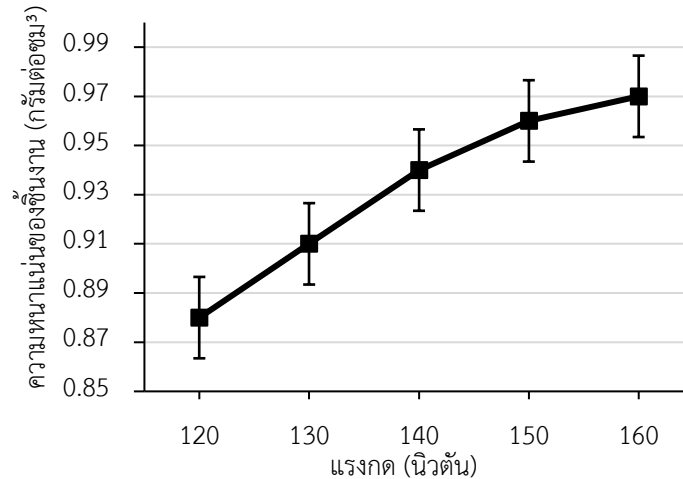
รูปที่ 4 ชิ้นข้าวต้มมัดหลังจากผ่านแม่พิมพ์

4. ผลการทดลอง

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ทำขึ้นเพื่อประเมินประสิทธิภาพในการขึ้นรูปข้าวต้มมัดให้ได้ขนาดและรูปร่างที่สม่ำเสมอ โดยเครื่องอัดขึ้นรูปในงานวิจัยนี้ทำงานแบบ ระบบแม่พิมพ์กลไกกดอัดด้วยกระบอกนิวเมติกส์ (Pneumatic Mould Forming System) ซึ่งทำหน้าที่รับวัตถุดิบจากชุดป้อนและรีดแผ่นข้าว เครื่องป้อนกล้วย และเครื่องป้อนไส้ ตามลำดับ ก่อนเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นข้าวต้มมัดที่มีรูปทรงและขนาดตามต้องการ

4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์

ผลการทดสอบพบว่า ความเร็วในการอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ อยู่ในช่วง 12–15 รอบต่อนาที หรือประมาณ 720–900 ชิ้นต่อชั่วโมง โดยแต่ละรอบใช้เวลาเฉลี่ย 3.8–4.5 วินาทีต่อชิ้นงาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นข้าวและปริมาณไส้ในแต่ละสูตรการผลิต สำหรับ ความเร็วในการป้อนชิ้นข้าวต้มมัดเข้าสู่แม่พิมพ์ ถูกปรับให้สัมพันธ์กับการรีดแผ่นข้าวที่มีความเร็วเฉลี่ย 0.55 เมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 5 เพื่อให้กระบวนการอัดและป้อนทำงานประสานกันโดยไม่เกิดการทับซ้อนหรือค้างในช่องแม่พิมพ์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความหนาแน่นของขึ้นข้าวต้มมัด

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์แรงกดและคุณภาพขึ้นข้าวต้มมัด

ลำดับ	แรงกด (นิวตัน)	เปอร์เซ็นต์ขึ้นงานดี (เปอร์เซ็นต์)	หมายเหตุ
1	120	92	ข้าวต้มมัดมีลักษณะไม่แน่นมาก ข้าวหลวมเล็กน้อย
2	130	94	พื้นผิวเรียบ ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น
3	140	97	ความหนาแน่นสม่ำเสมอที่สุด เหมาะสมต่อการผลิตต่อเนื่อง
4	150	98	ข้าวแน่นและเกาะตัวดี แต่เริ่มมีการอัดแน่นเกิน
5	160	96	พบแนวโน้มน้ำแตกเล็กน้อยจากแรงกดสูง

แรงและระยะเวลาในการกดอัดขึ้นรูปเป็นตัวแปรสำคัญของคุณภาพขึ้นข้าวต้มมัด โดยผลการทดสอบพบว่า แรงกดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 120-150 นิวตัน และ ระยะเวลาในการกดอัดแต่ละรอบอยู่ที่ 3 วินาที ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการทำให้ข้าวเหนียวเกาะตัวแน่น โดยไม่ทำให้ไส้เค็ลหรือทะลุออกจากแผ่นข้าว ขนาดของขึ้นข้าวต้มมัดที่ได้มีความยาวเฉลี่ย 75 มิลลิเมตร ความกว้าง 30 มิลลิเมตร และความหนา 15 มิลลิเมตร โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน ± 1.5 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 2 พบว่าแรงกดมีผลโดยตรงต่อความหนาแน่นและคุณภาพของขึ้นข้าวต้มมัด โดยเมื่อแรงกดเพิ่มจาก 120 นิวตัน เป็น 140 นิวตัน ความหนาแน่นของขึ้นงานเพิ่มขึ้นต่อเนื่องและมีค่าความสม่ำเสมอสูงสุดในช่วงแรงกด 140-150 นิวตัน ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์ของขึ้นงานดีสูงสุด (97-98เปอร์เซ็นต์) ทั้งนี้แรงกดที่เกิน 150 นิวตัน พบแนวโน้มน้ำแตกของข้าวเหนียวจากการอัดแน่นเกินพอดี ทำให้คุณภาพลดลงเล็กน้อย ดังนั้นค่าที่เหมาะสมสำหรับการทำงานจริงคือแรงกดประมาณ 140-150 นิวตัน ซึ่งให้สมดุลระหว่างความหนาแน่น ความสม่ำเสมอ และความเร็วในการผลิตได้ดีที่สุด

4.1.1 ผลของเวลาในการอัดขึ้นรูปต่อคุณภาพขึ้นข้าวต้มมัด

ผลการทดลองพบว่าเวลาในการอัดขึ้นรูปมีผลต่อความสมบูรณ์ของขึ้นงานและความหนาแน่นของข้าวต้มมัดอย่างชัดเจน โดยเมื่อกำหนดเวลาอัดขึ้นรูปที่ 1.2 วินาที พบว่าขึ้นงานบางส่วนมีลักษณะการยึดเกาะของข้าวเหนียวไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ขึ้นงานดีเฉลี่ยอยู่ที่ 93 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่การเพิ่มเวลาอัดขึ้นรูปเป็น 1.5 วินาที ช่วยให้ข้าวเหนียวกระจายตัวและยึดเกาะกันได้ดีขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ขึ้นงานดีเพิ่มขึ้นเป็น 98 เปอร์เซ็นต์ และมีความหนาแน่นของขึ้นงานสม่ำเสมอมากที่สุด ดังตารางที่ 3

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเวลาอัดขึ้นรูปเป็น 1.8 วินาที พบแนวโน้มการอัดแน่นมากเกินไป ส่งผลให้เกิดการเสียรูปของชิ้นงานบางส่วน และทำให้เปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่ลดลงเหลือ 96 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น เวลาอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวต้มมัดด้วยเครื่องดันแบบคือ 1.5 วินาที ซึ่งให้สมดุลระหว่างคุณภาพชิ้นงานและประสิทธิภาพการผลิต

ตารางที่ 3 ผลของเวลาอัดขึ้นรูปต่อคุณภาพชิ้นงาน

เวลาอัดขึ้นรูป (วินาที)	เปอร์เซ็นต์ชิ้นงานดี (เปอร์เซ็นต์)
1.2	93
1.5	98
1.8	96

4.1.2 ผลของความเร็วย้ายพานลำเลียงต่อสมรรถนะการผลิต

ผลการทดลองพบว่าความเร็วย้ายพานลำเลียงมีผลต่อความต่อเนื่องของการป้อนวัตถุดิบและกำลังการผลิตของระบบ โดยที่ความเร็วย้ายพาน 0.50 เมตรต่อวินาที ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องแต่ยังมีกำลังการผลิตเฉลี่ยเพียง 760 ชิ้นต่อชั่วโมง เนื่องจากอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่แม่พิมพ์ค่อนข้างต่ำ

เมื่อเพิ่มความเร็วย้ายพานเป็น 0.55 เมตรต่อวินาที พบว่าระบบสามารถประสานการทำงานระหว่างชุดป้อนวัตถุดิบชุดป้อนถั่ว และชุดอัดขึ้นรูปได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้กำลังการผลิตเพิ่มขึ้นเป็นเฉลี่ย 820 ชิ้นต่อชั่วโมง และมีอัตราของเสียต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4

สำหรับความเร็วย้ายพานที่ 0.60 เมตรต่อวินาที แม้ว่ากำลังการผลิตจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่พบปัญหาการวางตำแหน่งวัตถุดิบคลาดเคลื่อนและการเข้าสู่แม่พิมพ์ไม่สมบูรณ์ในบางรอบการผลิต ส่งผลให้อัตราของเสียเพิ่มขึ้น ดังนั้น ความเร็วย้ายพานที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวต้มมัดด้วยเครื่องดันแบบคือ 0.55 เมตรต่อวินาที ซึ่งให้กำลังการผลิตสูงและมีความเสถียรของระบบดีที่สุด

ตารางที่ 4 ผลของความเร็วย้ายพานต่อกำลังการผลิต

ความเร็วย้ายพาน (เมตรต่อวินาที)	กำลังการผลิต (ชิ้นต่อชั่วโมง)	อัตราของเสีย (เปอร์เซ็นต์)
0.50	760	6.2
0.55	820	4.3
0.60	835	5.8

4.2 การเปรียบเทียบกำลังคนระหว่างกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมและสายการผลิตอัตโนมัติ

การประเมินสมรรถนะของระบบการผลิตดำเนินการโดยคำนวณกำลังการผลิตรวมต่อวัน ตามสมการที่ (1) ส่วนต้นทุนแรงงานรวม และต้นทุนแรงงานต่อหน่วย คำนวณตามสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบการผลิตแบบดั้งเดิมและระบบการผลิตอัตโนมัติ ได้ทำการวิเคราะห์ร้อยละการเพิ่มขึ้นและร้อยละการลดลงของตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องโดยใช้สมการที่ (4) และ (5)

$$\text{กำลังการผลิตรวม} = \text{กำลังการผลิตเฉลี่ยต่อชั่วโมง} \times \text{ชั่วโมงการทำงาน} \quad (1)$$

$$\text{ต้นทุนแรงงานรวม} = \text{จำนวนแรงงาน} \times \text{ค่าแรงต่อคนต่อวัน} \quad (2)$$

$$\text{ต้นทุนแรงงานต่อชิ้น} = \frac{\text{กำลังการผลิตรวมต่อวัน}}{\text{ต้นทุนแรงงานรวมต่อวัน}} \quad (3)$$

ก่อนการพัฒนาเทคโนโลยีสายการผลิตอัตโนมัติ กระบวนการผลิตข้าวต้มมัดแบบดั้งเดิมจำเป็นต้องใช้แรงงานคนจำนวนมากในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบ การปั้นข้าว การวางกล้วย การห่อ และการบรรจุ โดยจากการสำรวจข้อมูลภาคสนามจากผู้ประกอบการ พบว่าโรงงานขนาดกลางต้องใช้แรงงานไม่น้อยกว่า 12-15 คนต่อสายการผลิตหนึ่งชุด เพื่อให้สามารถผลิตได้ประมาณ 400-500 ชิ้นต่อชั่วโมง หรือประมาณ 4,000 ชิ้นต่อวัน (8 ชั่วโมงทำงาน)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การลดลง} = \frac{\text{ค่าก่อนปรับปรุง} - \text{ค่าหลังปรับปรุง}}{\text{ค่าก่อนปรับปรุง}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น} = \frac{\text{ค่าหลังปรับปรุง} - \text{ค่าก่อนปรับปรุง}}{\text{ค่าก่อนปรับปรุง}} \times 100 \quad (5)$$

หลังจากการติดตั้งและทดสอบระบบสายการผลิตข้าวต้มมัดอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานด้วย PLC ครอบคลุม 6 หน่วยหลัก ได้แก่ เครื่องป้อนและรีดแผ่นข้าว เครื่องป้อนกล้วย เครื่องป้อนไส้ เครื่องป้อนถั่ว เครื่องอัดขึ้นรูป และเครื่องบรรจุ ถู พบว่าสามารถลดจำนวนแรงงานลดลงเหลือเพียง 4-5 คนต่อสายการผลิต สำหรับการควบคุม ตรวจสอบ และบรรจุภัณฑ์ขั้นสุดท้าย ซึ่งคิดเป็นการลดกำลังคนลงกว่า 60-65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกระบวนการเดิมดังตารางที่ 5

นอกจากนี้ สายการผลิตอัตโนมัติยังช่วยลดความเมื่อยล้าและความเสี่ยงจากการทำงานซ้ำ ๆ ของแรงงาน เพิ่มความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ และลดความแปรปรวนของคุณภาพที่เกิดจากทักษะเฉพาะตัวของแรงงานแต่ละคน ทำให้โรงงานสามารถบริหารจัดการต้นทุนแรงงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และเพิ่มกำลังการผลิตรวมเป็น ไม่น้อยกว่า 800 ชิ้นต่อชั่วโมง หรือ 6,400 ชิ้นต่อวัน ภายใต้แรงงานเพียงหนึ่งในสามของระบบเดิม

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบจำนวนแรงงาน กำลังการผลิต และต้นทุนแรงงาน

รายการเปรียบเทียบ	ระบบผลิตแบบดั้งเดิม	ระบบผลิตอัตโนมัติที่พัฒนาในงานวิจัย	ผลต่าง (ลดลงต่อเพิ่มขึ้น)
จำนวนแรงงานต่อสายการผลิต	6-8 คน	2 คน	ลดลง 60-65 เปอร์เซ็นต์
ชั่วโมงการทำงานต่อวัน	8 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง	เท่ากัน
กำลังการผลิตเฉลี่ย (ชิ้นต่อชั่วโมง)	400-500 ชิ้น	800-850 ชิ้น	เพิ่มขึ้น 70-80 เปอร์เซ็นต์
กำลังการผลิตรวม (ชิ้นต่อวัน)	4,000 ชิ้น	6,400-6,800 ชิ้น	เพิ่มขึ้น 70-80 เปอร์เซ็นต์
ต้นทุนแรงงานเฉลี่ย (บาทต่อคนต่อวัน)	500 บาท	500 บาท	เท่ากัน
ต้นทุนแรงงานรวมต่อวัน (บาท)	6,000-7,500 บาท	2,000-2,500 บาท	ลดลง 65 เปอร์เซ็นต์
ต้นทุนแรงงานต่อชิ้น (บาทต่อชิ้น)	1.50-1.80 บาท	0.35-0.40 บาท	ลดลง 75 เปอร์เซ็นต์
อัตราชิ้นงานดี (เปอร์เซ็นต์)	90-92 เปอร์เซ็นต์	95-98 เปอร์เซ็นต์	เพิ่มขึ้น 6 เปอร์เซ็นต์
อัตราของเสีย (เปอร์เซ็นต์)	8-10 เปอร์เซ็นต์	<5 เปอร์เซ็นต์	ลดลง 50 เปอร์เซ็นต์

5. อภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 800-850 ชิ้นต่อชั่วโมง สูงกว่ากระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมที่มีกำลังการผลิตประมาณ 400-500 ชิ้นต่อชั่วโมงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เป็นผลจากการประยุกต์ใช้ระบบควบคุม PLC ร่วมกับระบบนิวเมติกส์ซึ่งช่วยให้ชุดป้อนวัตถุดิบ ชุดอัดขึ้นรูป และระบบลำเลียงทำงานประสานกันอย่างต่อเนื่อง ลดเวลาสูญเสียในกระบวนการผลิต

และลดความคลาดเคลื่อนจากการปฏิบัติงานของแรงงานมนุษย์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rao และคณะ [4] ที่รายงานว่าระบบ PLC สามารถเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพของสายการผลิตอาหารอัดโนมิตได้

ผลการทดลองยังพบว่าเวลาในการอัดขึ้นรูปมีผลโดยตรงต่อคุณภาพและความสมบูรณ์ของชิ้นงาน โดยเวลาอัดขึ้นรูปที่สั้นเกินไปทำให้ข้าวเหนียวเกาะตัวไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นต่ำและเกิดการหลุดร่อนของส่วนประกอบบางส่วน ขณะที่เวลาอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมช่วยให้แรงกดกระจายตัวทั่วทั้งชิ้นงาน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอและมีเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานดีสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเวลาอัดขึ้นรูปมากเกินไปพบแนวโน้มการอัดแน่นเกินความจำเป็น ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตลดลง ดังนั้นการกำหนดเวลาอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพของข้าวต้มมัด

นอกจากนี้ ความเร็วสายพานลำเลียงยังมีผลต่อความต่อเนื่องของการป้อนวัตถุดิบและเสถียรภาพของกระบวนการผลิต โดยความเร็วที่ต่ำเกินไปส่งผลให้กำลังการผลิตลดลง ขณะที่ความเร็วสูงเกินไปอาจทำให้ตำแหน่งของวัตถุดิบคลาดเคลื่อนและเพิ่มโอกาสเกิดของเสียจากกระบวนการขึ้นรูป ผลการทดลองพบว่าความเร็วสายพานที่ 0.55 เมตรต่อวินาที สามารถสร้างสมดุลระหว่างกำลังการผลิต คุณภาพผลิตภัณฑ์ และเสถียรภาพของระบบได้ดีที่สุด ทั้งยังช่วยให้การทำงานของชุดป้อนถั่วดำชุดอัดขึ้นรูป และกลไกปลดชิ้นงานเป็นไปอย่างสอดคล้อง ส่งผลให้ข้าวต้มมัดมีขนาดใกล้เคียงกันและมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดไม่เกิน ± 1.5 มิลลิเมตร

โดยสรุป เครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัดโนมิตแบบแม่พิมพ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มกำลังการผลิต ควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ และลดการฟุ้งกระจายแรงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่อง ได้แก่ แรงกดในการขึ้นรูป เวลาในการอัดขึ้นรูป และความเร็วสายพานลำเลียง ซึ่งต้องควบคุมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงและมีอัตราของเสียต่ำ ผลลัพธ์ที่ได้สะท้อนถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรมอาหารพื้นถิ่นไทย และสามารถเป็นแนวทางในการยกระดับการผลิตของวิสาหกิจชุมชนและผู้ประกอบการ SME สู่ระบบการผลิตที่อุตสาหกรรมในอนาคต

6. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัดโนมิตแบบแม่พิมพ์ โดยประยุกต์ใช้ระบบนิวเมติกส์และระบบควบคุมอัตโนมัติผ่าน PLC เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตข้าวต้มมัดให้มีประสิทธิภาพสูงชัน ผลการวิจัยพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานร่วมกับระบบป้อนวัตถุดิบและระบบลำเลียงได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ โดยสามารถผลิตข้าวต้มมัดได้เฉลี่ย 800-850 ชิ้นต่อชั่วโมง หรือมากกว่า 6,400 ชิ้นต่อวัน ภายใต้อัตราของเสียต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าแรงกดในการขึ้นรูปมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยช่วงแรงกดที่เหมาะสมอยู่ที่ 140–150 นิวตัน ซึ่งให้ความหนาแน่นและความสม่ำเสมอของชิ้นงานดีที่สุด พร้อมทั้งสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของข้าวต้มมัดให้ใกล้เคียงกันทุกชิ้น นอกจากนี้ ระบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นยังสามารถลดจำนวนแรงงานในสายการผลิตได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ และช่วยลดต้นทุนแรงงานต่อหน่วยได้อย่างมีนัยสำคัญ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจาก กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม และสำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ โดยหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) ร่วมกับ บริษัท โรส อารยา ฟู้ด จำกัด ประจำปีงบประมาณ 2566

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] MGR Online, “Getting to Know 'Bai Salat Thai Dessert Leaf', Dominating the Khao Tom Mud Export Market for Over 40 Years,” *Manager Online*, Jun. 08, 2016. [Online]. Available: <https://mgronline.com/smes/detail/9590000057048> (in Thai).
- [2] Shweta et al., “Assessment of Advancements and Applications of Robotics, Artificial Intelligence, and Automated Technology in the Modern Food Sector,” *Applied Food Research*, vol. 5, no. 2, p. 101261, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.afres.2025.101261.
- [3] L. Zhang, R. M. Boom, and Y. Ma, “Machine Learning in Automated Food Processing: A Mini Review,” *Annual Review of Food Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 25–37, Apr. 2025, doi: 10.1146/annurev-food-111523-122039.
- [4] V. S. Rao, P. S. K., and S. K. V., “Design of PLC Based Automated Food Processing Machine,” *International Journal of Mechanics*, vol. 15, pp. 22–29, Feb. 2021, doi: 10.46300/9104.2021.15.3.
- [5] E. Misimi, A. Olofsson, A. Eilertsen, E. R. Øye, and J. R. Mathiassen, “Robotic Handling of Compliant Food Objects by Robust Learning from Demonstration,” *arXiv preprint arXiv:2309.12856*, Sep. 2023, doi: 10.48550/arxiv.2309.12856.
- [6] B. Vogel-Heuser, J. Fischer, S. Feldmann, S. Ulewicz, and S. Rösch, “Modularity and Architecture of PLC-Based Software for Automated Production Systems: An Analysis in Industrial Companies,” *Journal of Systems and Software*, vol. 131, pp. 35–62, May 2017, doi: 10.1016/j.jss.2017.05.051.
- [7] L. Zhu, P. Spachos, E. Pensini, and K. Plataniotis, “Deep Learning and Machine Vision for Food Processing: A Survey,” *arXiv preprint arXiv:2103.16106*, Mar. 2021, doi: 10.48550/arxiv.2103.16106.
- [8] C. I. Cardona, H. A. Tinoco, L. Perdomo-Hurtado, E. Duque-Dussán, and J. Banout, “Optimizing Harvesting Efficiency: Development and Assessment of a Pneumatic Air Jet Excitation Nozzle for Delicate Biostructures in Food Processing,” *Foods*, vol. 13, no. 10, p. 1458, May 2024, doi: 10.3390/foods13101458.
- [9] R. Komljenovic and R. Komljenovic, “Food Manufacturing Companies Rely on Pneumatic Actuators,” *JHFOSTER*, Apr. 02, 2026. [Online]. Available: <https://jhfooster.com/automation-blogs/food-manufacturing-companies-rely-on-pneumatic-actuators/>
- [10] Y. Kim and S. Kim, “Automation and Optimization of Food Process Using CNN and Six-Axis Robotic Arm,” *Foods*, vol. 13, no. 23, p. 3826, Nov. 2024, doi: 10.3390/foods13233826.

การลดความสูญเสียเปล่าทางพลังงานของเครื่องทำความเย็นตามแนวทางของลีน

กรณีศึกษา กระบวนการผลิตสารเคลือบกระป๋องชนิดโลหะ

Application of Lean Principles for Energy Waste Reduction in Refrigeration

Systems: A Case study of the Metal Can Coating Production Process

นิวัฒน์ จันโทกุล^{1*} และ เลิศเลขา ศรีรัตน์¹

¹สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง เลขที่ 2086 ถนนรามคำแหง
แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240

Nivat Jantokul^{1*} and Lerdlekha Sriratana¹

¹Engineering Management and Technology Program, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University
No. 2086, Ramkhamhaeng, Hua Mak, Bang Kapi, Bangkok, 10240

*Corresponding author Email: 6714940015@rumail.ru.ac.th

(Received: June 5, 2026; Revise: June 23, 2026; Accepted: June 29, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของความสูญเสียเปล่าทางพลังงานในระบบทำความเย็น (Chiller) ของกระบวนการผลิตสารเคลือบกระป๋องชนิดโลหะในบริษัทแห่งหนึ่ง ซึ่งเป็นระบบที่ใช้พลังงานสูงสุด เฉลี่ย 16,042 kWh/เดือน จากการศึกษาพบสาเหตุหลักของความสูญเสียเปล่ามี 2 ประการ คือ การเดินเครื่องทิ้งไว้ในสภาวะเตรียมพร้อมแต่ไม่มีการทำงาน (Idling) และการปรับตั้งอุณหภูมิน้ำเย็นต่ำกว่าการใช้งานจริงทำให้ใช้พลังงานมากเกินความจำเป็น (Over Supply) ผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางปรับปรุง 4 ด้าน ประกอบด้วย (1) ปรับเพิ่มอุณหภูมิน้ำเย็นจาก 10 °C เป็น 14 °C ให้สอดคล้องกับภาระงาน (2) ลดจำนวนการทำงานของคอมเพรสเซอร์จาก 3 ชุด เหลือ 2 ชุด (3) จัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงาน (SOP) คู่มือการใช้งาน (WI) และการฝึกอบรมผู้ใช้งาน (4) ติดตั้งระบบ IoT เพื่อตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ ผลการดำเนินงานในช่วงเดือนมกราคม – มีนาคม 2569 พบว่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยลดลงเหลือ 12,085 kWh/เดือน หรือลดลงร้อยละ 24.6 โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสารเคลือบ คิดเป็นค่าใช้จ่ายทางพลังงานที่ลดลงได้โดยประมาณ 227,923 บาท/ปี นอกจากนี้พนักงานยังได้มีส่วนร่วมในการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

คำสำคัญ: ลีน เครื่องทำความเย็น ความสูญเสียเปล่าทางพลังงาน อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

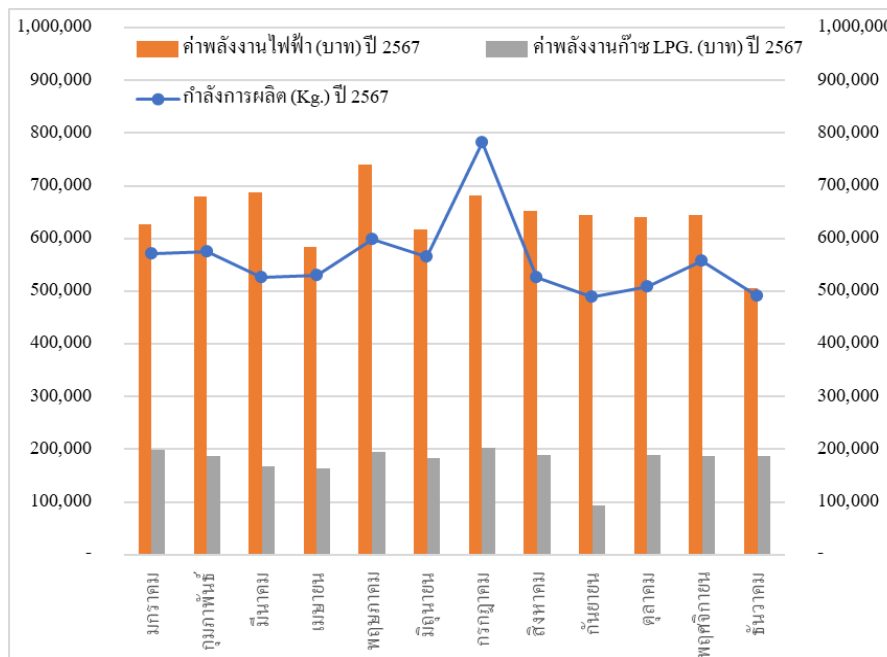
This research aims to analyze the causes of energy waste in a refrigeration system (chiller) used in the metal can coating production process at a packaging manufacturing company. The chiller system was identified as the highest energy-consuming system in the production process, with an average electricity consumption of 16,042 kWh per month. The study identified two primary causes of energy waste: operating the system in standby mode and setting the chilled water temperature below the requirement, resulting in excessive energy consumption (over-supply). Based on these findings, four improvement measures were implemented: (1) increasing the chilled water temperature from 10 °C to 14 °C to better match the actual cooling load, (2) reducing the number of operating compressors from three units to two units, (3) establishing

standard operating procedures (SOP), work instructions (WI), and user training programs, and (4) installing an Internet of Things (IoT) system to measure and monitor energy consumption in real time. The implementation results during January–March 2026 showed that the average electricity consumption decreased to 12,085 kWh per month, representing a reduction of 24.6%, without affecting the quality of the coating product. This resulted in an estimated annual energy cost saving of approximately 227,923 THB. In addition, employees became more involved in promoting efficient energy use practices.

Keywords: Lean, Chiller, Energy Waste, Internet of Things (IoT)

1. บทนำ

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมยังเป็นผู้บริโภคพลังงานที่ใหญ่ที่สุด คิดเป็นร้อยละ 42.2 ของการใช้พลังงานในประเทศ ดังนั้นการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจึงเป็นการเพิ่มเสถียรภาพทางพลังงาน ช่วยลดต้นทุนการผลิต สร้างความเชื่อมั่นจากนักลงทุนต่างประเทศ พร้อมทั้งขยายโอกาสทางธุรกิจให้เติบโต [1]



รูปที่ 1 ค่าไฟฟ้าและเชื้อเพลิง LPG เทียบกับปริมาณการผลิต

บริษัท ทรนศึกษาเป็นผู้ผลิตสารเคลือบภายในกระป๋องบรรจุภัณฑ์ชนิดโลหะที่ใช้พลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงจากก๊าซ LPG เป็นหลัก ในปี พ.ศ. 2567 มีค่าใช้จ่ายทางพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 7,704,255 บาท และมีค่าก๊าซ LPG เท่ากับ 2,144,225 บาท โดยมีสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าก๊าซ LPG ดังแสดงในรูปที่ 1 จากการศึกษาดังกล่าวพบแนวโน้มค่าพลังงานสูงขึ้น ซึ่งคาดว่าเกิดจากการสูญเสียพลังงานโดยเฉพาะในส่วนระบบทำความเย็นซึ่งเป็นระบบที่ใช้พลังงานสูงสุด งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุและพัฒนาแผนงานที่เหมาะสมเพื่อลดความสูญเสียทางพลังงานของเครื่องทำความเย็นในบริษัทดังกล่าว

2. รูปแบบการวิจัย

การศึกษานี้เป็นงานวิจัยเชิงประยุกต์ที่ได้นำแนวคิดแบบลีน (Lean) มาวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาความสูญเสียทางพลังงาน โดยประยุกต์ใช้การสูญเสียหลัก 16 ประการ (16 Big losses) การวิเคราะห์รากปัญหาตามหลัก 4M1E และการวิเคราะห์แบบ Why-Why Analysis นอกจากนี้ยังได้นำหลักการ CAP-Do ซึ่งเป็นแผนเชิงกลยุทธ์เพื่อตรวจสอบและแก้ไขปัญหามาจากการ ตรวจสอบ (Check), ทบทวน/แก้ไข (Act), วางแผน (Plan), ปฏิบัติ (Do) ร่วมกับระบบตรวจวัดทางพลังงาน IoT แบบเรียลไทม์ ซึ่งมี 6 แนวปฏิบัติหลักได้แก่ (1) การกำจัด (Eliminate) (2) การใช้ซ้ำ (Reuse) (3) การเปลี่ยนแปลง (Change) (4) การซ่อมแซม (Repair) (5) การลดการใช้งาน (Reduce) (6) การหยุดใช้งาน (Stop) ซึ่งพบว่าสามารถแก้ไขปัญหาค่าความสูญเสียทางพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2]

2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลีนเป็นแนวคิดที่ได้ประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากการจัดการกระบวนการเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้แก่องค์กรที่มุ่งเน้นการกำจัดความสูญเสีย (Waste) และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดความสูญเสียทางด้านพลังงานในกระบวนการผลิต จึงช่วยให้เกิดการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมและลดต้นทุนการผลิตลงได้ [3] การลดความสูญเสียทางพลังงานโดยใช้ทฤษฎีการสูญเสียหลัก 16 ประการ ทำให้ค่าพลังงานจำเพาะต่อหน่วยการผลิต (SEC) ของเครื่องจักร Electrolytic De flash and Water jet ลดลงเหลือ 0.66 kWh/EU [4] การวิเคราะห์สาเหตุความสูญเสียทางพลังงานสามารถวิเคราะห์ตามหลัก 4M1E เพื่อปรับปรุงการทำงานสามารถลดการใช้พลังงานของมอเตอร์ปั่นด้ายได้ถึงร้อยละ 40 [5] นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ Why-Why Analysis เพื่อวิเคราะห์ความสูญเสียในกระบวนการพันทราย และออกแบบเครื่องพันทรายที่ใช้งานได้เหมาะสม ซึ่งสามารถลดเวลาทำงาน ลดจำนวนพนักงาน และลดต้นทุนการผลิตได้ 7,890 บาท/เดือน [6] การใช้ Why-Why Analysis ค้นหาความผิดปกติของเครื่องบดซีเมนต์ยังสามารถนำไปแก้ไขปัญหาลดความสิ้นเปลืองทางพลังงานไฟฟ้า (SEEC) ได้ถึง 2 kWh/ตัน [7] ส่วนการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานเพื่อลดความสูญเสียทางพลังงานสามารถนำแนวคิดแบบลีนมาประยุกต์ได้ เช่น การลดความสูญเสียทางพลังงานในเครื่องจักร (CNC) ด้วยการวางแผนหยุดเครื่องจักรในช่วงเวลาที่ไม่ได้โหลด และชะลอความเร็วรอบเครื่องจักรระหว่างรอชิ้นงานสามารถประหยัดพลังงานได้ถึงร้อยละ 53 [8] และยังสามารถผสมผสานการจัดการพลังงานกับการทำแผนผังสายธารคุณค่า (Value Stream Mapping) โดยอิงหลักการการผลิตแบบลีน (Lean manufacturing) เพื่อลดพลังงานในกระบวนการผลิตได้ถึงร้อยละ 50 [9] อย่างไรก็ตาม การลดความสูญเสียทางพลังงานควรมีการตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถนำเครือข่ายเซ็นเซอร์ สำหรับตรวจสอบการใช้พลังงานเครื่องจักรในอุตสาหกรรมผ่านระบบ IoT เพื่อให้สามารถเข้าถึงเว็บแอปพลิเคชันและตรวจติดตามเพื่อการจัดการพลังงานเครื่องจักรแบบเรียลไทม์ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ [10]

2.2 ระเบียบวิธีการวิจัย

รูปแบบการศึกษานี้มีระเบียบวิธีแบบผสมผสาน (Mixed Methods Research) โดยใช้เครื่องมือวิจัยสำหรับเก็บข้อมูลที่มีการสอบเทียบตามมาตรฐาน ดังนี้

- (1) เครื่องวัดอัตราการไหล (Ultrasonic flow sensor) ย่านการวัด 0 – 10 เมตร/วินาที ความแม่นยำ $\pm 1\%$
- (2) เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Power meter) ย่านการวัด 150 – 600 Vac. ความแม่นยำ $\pm 0.2\%$ rdg. $\pm 0.1\%$ f.s.
- (3) เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (Temperature Recorder) ย่านการวัด -50 ถึง 1000 °C ความแม่นยำ $\pm 0.4\%$ rdg.

2.2.1 วิธีการดำเนินการวิจัยมี 6 ขั้นตอน ดังนี้

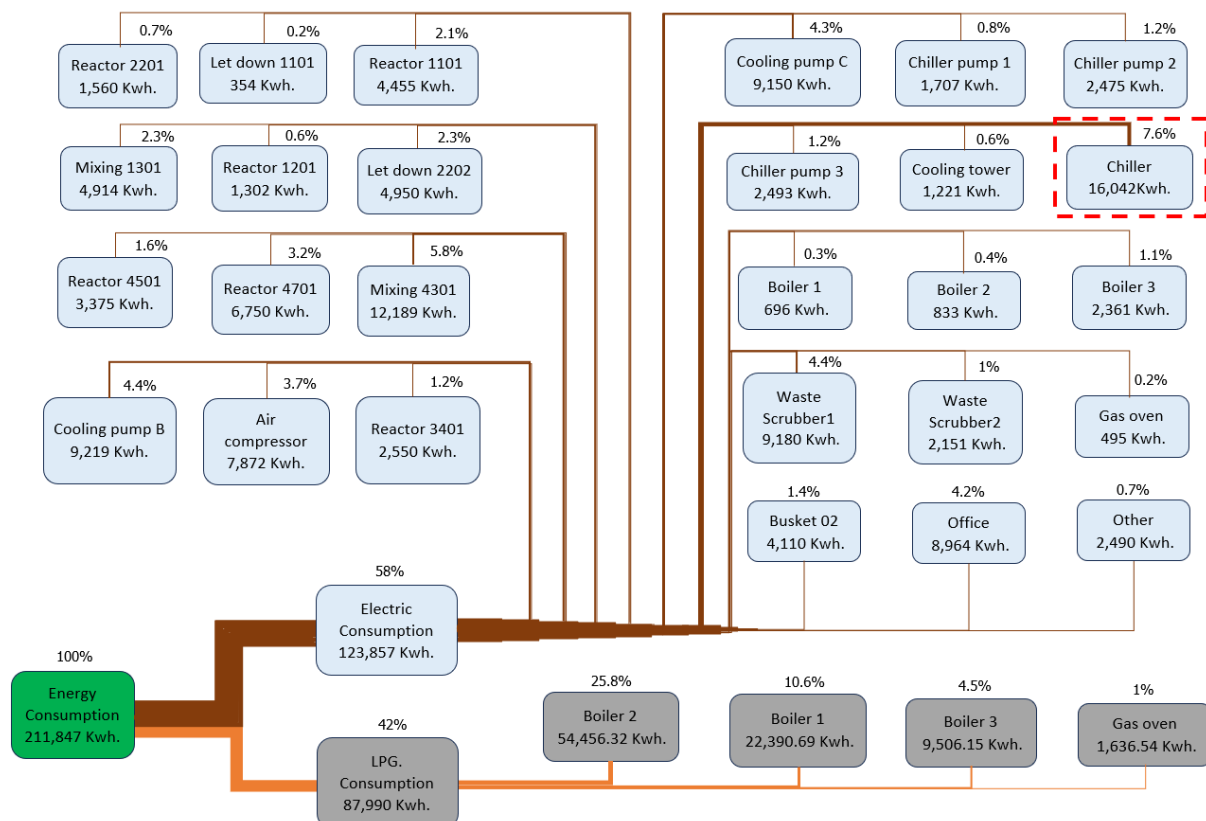
- (1) ศึกษาการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตและรวบรวมข้อมูลเพื่อกำหนดปัญหา
- (2) ศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมเพื่อนำมาออกแบบ วิธีการดำเนินการวิจัย
- (3) เก็บข้อมูลการใช้พลังงานของเครื่องทำความเย็นและวิเคราะห์ความสูญเสียทางพลังงาน
- (4) กำหนดแนวทางการลดความสูญเสียทางพลังงานเครื่องทำความเย็น

(5) วิเคราะห์ผลเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานหลังปรับปรุงและประเมินความรู้ความเข้าใจของผู้ปฏิบัติงาน

(6) สรุปและรายงานผลต่อผู้เกี่ยวข้อง

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลพลังงานเครื่องทำความเย็น

จากการเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตพบว่าเครื่องทำความเย็นมีปริมาณการใช้งานสูงสุดที่ 192,504 kWh/ปี คิดเป็นร้อยละ 7.6 ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดเมื่อเทียบกับปริมาณการใช้ไฟฟ้าปีฐาน พ.ศ. 2567 ดังแสดงในรูปที่ 2 จากการวัดค่าพลังงานพบว่าเครื่องทำความเย็นใช้พลังงานเฉลี่ยเท่ากับ 53.47 kW และใช้พลังงาน 16,042 kWh/เดือน



รูปที่ 2 แผนผังการไหลของพลังงาน (Energy flow Diagram)

2.4 การวิเคราะห์สาเหตุความสูญเสียทางพลังงาน

ระบบเครื่องทำความเย็นของบริษัทกรณีศึกษาใช้บอร์ดควบคุมแบบไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งสั่งการทำงานของคอมเพรสเซอร์ตามอุณหภูมิน้ำเย็นที่วัดจากอีวาพอเรเตอร์ เพื่อให้สอดคล้องกับภาระโหลดความเย็นของกระบวนการผลิต จากการตรวจวัดพบว่า คอมเพรสเซอร์ชุดที่ 1 ส่วนใหญ่อยู่ในโหมดเตรียมพร้อม (Standby) ขณะที่คอมเพรสเซอร์ชุดที่ 2 และ 3 ทำงานในโหมดโหลดสูง (Full Load) และโหลดต่ำ (Part Load) ตามลำดับ แม้คอมเพรสเซอร์ในโหมดเตรียมพร้อมจะไม่ผลิตความเย็น แต่ยังคงใช้พลังงานไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดความสูญเสียทางพลังงานในลักษณะการเดินเครื่องทิ้งไว้ (Idling) จากการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า-ออกของถังผลิตสารเคลือบ 2 ถัง แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าเครื่องทำความเย็นตั้งค่าอุณหภูมิน้ำเย็นที่ 10 °C ขณะที่อุณหภูมิสารเคลือบเฉลี่ยอยู่ที่ 91 °C และ 46 °C ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่ผลต่างอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้าและขาออก (ΔT) มีค่าเฉลี่ยเพียง 1.2 °C และ 1.0 °C เมื่อพิจารณาจากสมการการถ่ายเทความร้อน ($Q = \dot{m}c_p\Delta T$)

ค่า ΔT ที่ต่ำแสดงถึงภาระโหลดความเย็นของกระบวนการผลิตมีค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตความเย็นของระบบ จึงให้เกิดการผลิตความเย็นเกินความจำเป็น ดังนั้น การปรับเพิ่มอุณหภูมิน้ำเย็นให้เหมาะสมกับภาระโหลดจริงจึงสามารถช่วยลดการใช้พลังงานของระบบได้



รูปที่ 3 วัดอุณหภูมิน้ำเย็นเข้า-ออก ถึงผลิตรายละเอียด

2.4.1 การวิเคราะห์ปัญหาตามหลัก 4M1E

จากการเก็บข้อมูลพลังงานจากพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา เมื่อวิเคราะห์รากของปัญหาตามหลัก 4M1E สามารถสรุปได้ ดังนี้

- (1) ด้านคน (Man) พบปัญหาการขาดความรู้ความเข้าใจของผู้ปฏิบัติงานที่ใช้งานระบบ จึงตั้งอุณหภูมิเครื่องทำความเย็นต่ำเกินความจำเป็นตามความเคยชิน
- (2) ด้านเครื่องจักร (Machine) พบภาระความร้อนในกระบวนการผลิตน้อยกว่าระบบทำความเย็นที่มี เนื่องจากออกแบบระบบขนาดใหญ่เกินการใช้งานจริง (Over size) และเครื่องทำความเย็นอยู่ในสภาวะเตรียมพร้อม (Stand by) เป็นระยะเวลานานโดยไม่ผลิตความเย็นแต่ยังคงใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่อย่างต่อเนื่อง
- (3) ด้านวิธีการ (Method) ขาดมาตรฐานการปรับตั้งอุณหภูมิเครื่องทำความเย็นที่ชัดเจน ทำให้ผู้ปฏิบัติงานตั้งค่าไม่มีการอ้างอิงข้อมูลทางเทคนิคที่ถูกต้อง (Over Conditioning/Over Supply)
- (4) ด้านวัสดุ (Material) พบการระบายความร้อนเครื่องทำความเย็นเสียรูปจากการฉีดล้างด้วยน้ำแรงดันสูง ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง การไหลของอากาศไม่ดี ส่งผลให้คอมเพรสเซอร์เกิดการสูญเสียพลังงาน

2.4.2 แนวทางแก้ไขปัญห

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วย Why-Why analysis แสดงดังรูปที่ 4 อ้างอิงตามการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา สามารถกำหนดแนวทางการลดความสูญเสียทางพลังงานของเครื่องทำความเย็นตามแนวปฏิบัติ CAP-Do ดังนี้

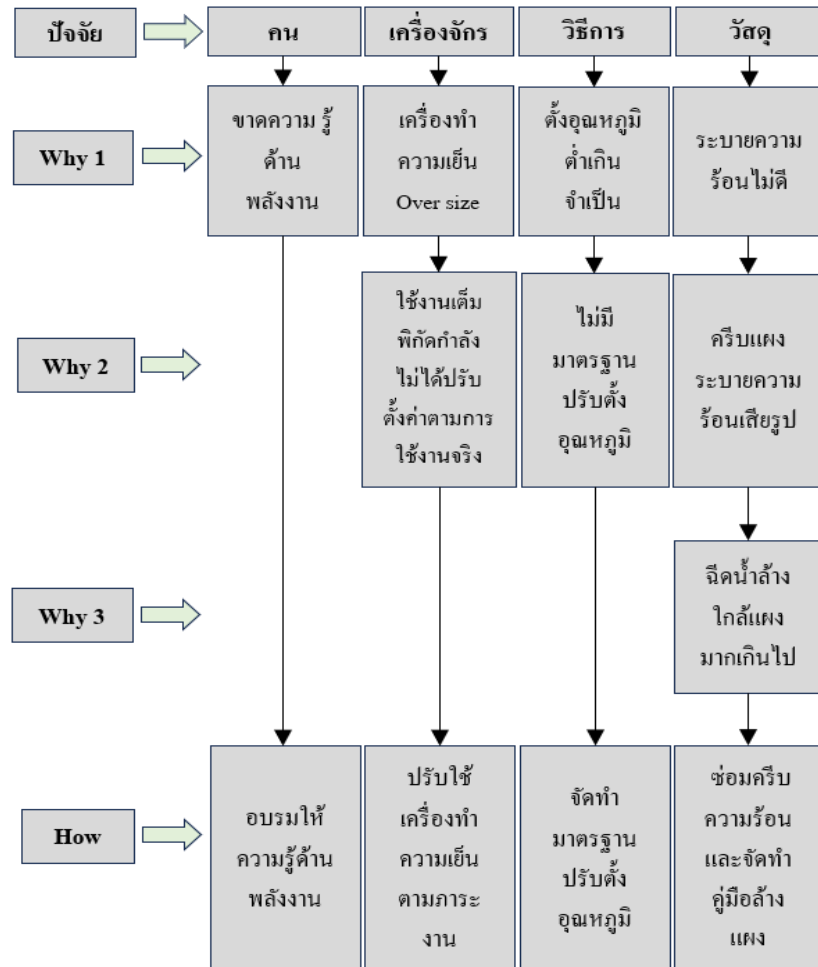
- (1) ปรับอุณหภูมิเครื่องทำความเย็นจาก 10 °C เป็น 14 °C (Change)
- (2) จัดทำคู่มือการใช้งานเครื่องทำความเย็น
- (3) ลดการใช้งานคอมเพรสเซอร์จาก 3 ชุด เหลือ 2 ชุด (Reduce)

(4) จัดทำมาตรฐานการปรับตั้งอุณหภูมิ (SOP)

(5) ปรับแต่งครีบบายความร้อน (Repair)

(6) ติดตั้งระบบติดตามการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ (IoT) โดยติดตั้งชุดวัดกระแสไฟฟ้า (CT) เครื่องทำความเย็น ส่งไปยังเครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า (Power Meter) ข้อมูลที่วัดได้จะส่งเข้าสู่อุปกรณ์เชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (Gateway) แล้วแปลงข้อมูล (Data) เพื่อส่งต่อแบบไร้สายไปยังแหล่งเก็บข้อมูล (Cloud Server) และแสดงข้อมูลบนจอแสดงผล (Dash Board)

(7) อบรมให้ความรู้กับผู้ใช้งานเครื่องทำความเย็น



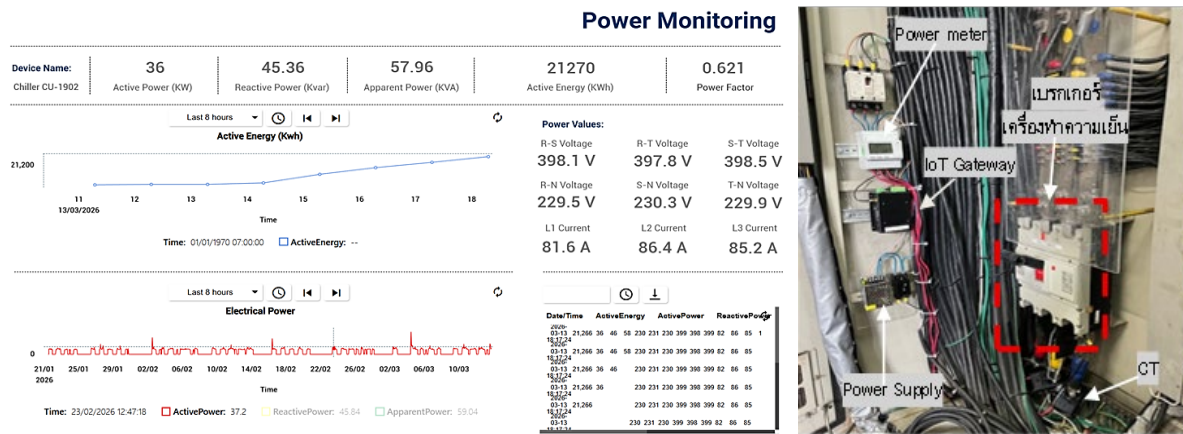
รูปที่ 4 การวิเคราะห์ปัญหาด้วย Why-Why Analysis

นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ประเมินผลการดำเนินการโดยใช้แบบสอบถามความคิดเห็นของผู้ใช้งานโดยใช้เครื่องมือที่ผ่านการพิจารณาความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา (Index of Object Congruence: IOC) โดยผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 3 ท่าน อีกด้วย

3. ผลการวิจัย

จากแผนการดำเนินงานเพื่อลดความสูญเสียทางพลังงานของเครื่องทำความเย็นที่ได้นำเสนอ ผู้วิจัยได้นำไปปฏิบัติจริงเป็นระยะเวลา 3 เดือน (มกราคม ถึง มีนาคม 2569) โดยได้ปรับเพิ่มอุณหภูมิเครื่องทำความเย็นและลดการใช้งานคอมเพรสเซอร์ ผลการตรวจวัดค่าทางพลังงานจากการติดตั้งระบบติดตามการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ (IoT) ดังแสดงในรูปที่

5 พบว่าสามารถลดการใช้พลังงานเครื่องทำความเย็นจาก 16,042 kWh/เดือน เหลือ 12,085 kWh/เดือน หรือลดลงร้อยละ 24.6 คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ลดลงเท่ากับ 18,993.6 บาท/เดือน หรือ 227,923 บาท/ปี โดยไม่กระทบต่อคุณภาพสารเคลือบจากค่าการตรวจสอบปริมาณเนื้อสารเคลือบทั้งหมดที่ไม่ละลาย (Total Non-Volatile: %TNV) วัดได้ 60.4% โดยค่ามาตรฐานเท่ากับ 58–62% และยังสามารถลดต้นทุนการผลิตทางพลังงานไฟฟ้าได้ร้อยละ 2.96 เมื่อเทียบกับค่าไฟฟ้าปี พ.ศ. 2567 นอกจากนี้ผู้วิจัยได้จัดทำมาตรฐานการปรับตั้งอุณหภูมิ (SOP) รวมถึงคู่มือการใช้งานและการทำความสะอาดแผงระบายความร้อนของเครื่องทำความเย็น (WI) และได้ปรับแต่งครีบบางระบายความร้อนผลจากการปรับปรุง พบว่าค่าความเร็วเฉลี่ยลมผ่านแผงระบายความร้อนจาก 2.7 เมตร/วินาที เพิ่มขึ้นเป็น 3.3 เมตร/วินาที จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) เครื่องทำความเย็นจากเดิมก่อนปรับปรุงเท่ากับ 4.15 เมื่อปรับปรุงการใช้งานเครื่องทำความเย็นตามแนวทางที่ผู้วิจัยได้นำเสนอ พบว่าค่า COP เพิ่มขึ้นเป็น 5.4 จากการสอบถามความคิดเห็นของผู้ปฏิบัติงานต่อแผนงานที่นำเสนอพบว่า มีความพึงพอใจและเห็นด้วยกับแนวทางการปรับปรุงเพื่อลดการใช้พลังงานในระบบเครื่องทำความเย็น โดยเห็นว่าเป็นมาตรการที่สามารถปฏิบัติได้จริงและไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต

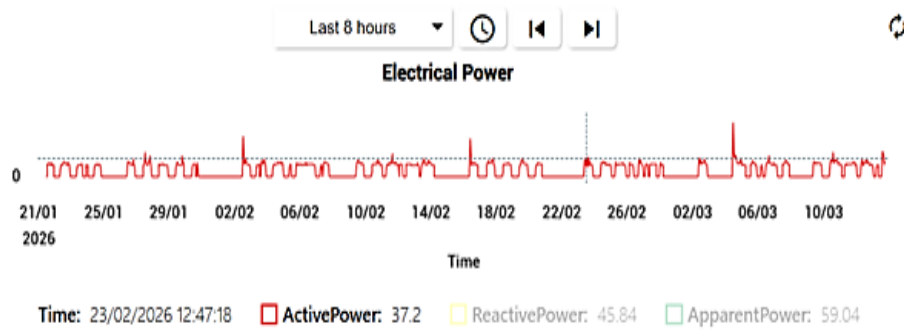


รูปที่ 5 การใช้พลังงานเครื่องทำความเย็น เมื่อลดคอมเพรสเซอร์เหลือ 2 ชุดตามแผนงาน

4. สรุปและอภิปรายผล

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของความสูญเสียทางพลังงานในระบบเครื่องทำความเย็นที่ใช้ในกระบวนการผลิตสารเคลือบภายในกระป๋องชนิดโลหะของบริษัทกรณีศึกษา โดยประยุกต์ใช้แนวคิดแบบลีน (Lean) เพื่อระบุความสูญเสียและกำหนดแนวทางปรับปรุงการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จากการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานและการปฏิบัติงานของพนักงาน พบว่าสาเหตุหลักของความสูญเสียทางพลังงานเกิดจากการตั้งค่าอุณหภูมิเครื่องทำความเย็นต่ำกว่าการใช้งานจริง การขาดมาตรฐานและคู่มือการปฏิบัติงานการใช้เครื่องทำความเย็นที่มีกำลังเกินความต้องการของกระบวนการผลิต รวมถึงสภาพอุปกรณ์ระบายความร้อนที่เสื่อมสภาพ ส่งผลให้ระบบทำความเย็นใช้พลังงานมากเกินความจำเป็น แนวทางการปรับปรุงได้ดำเนินการตามหลักการลีนและแนวทาง CAP-Do โดยการกำจัดการที่ก่อให้เกิดมูลค่าและปรับปรุงการใช้พลังงานให้สอดคล้องกับการทำงานของระบบ โดยการให้ความรู้ด้านการใช้พลังงานแก่พนักงาน การจัดทำมาตรฐานและคู่มือการใช้งานเครื่องทำความเย็น การลดจำนวนการใช้งานคอมเพรสเซอร์ จาก 3 ชุด เหลือ 2 ชุด และการปรับปรุงสภาพครีบบางระบายความร้อนของเครื่องทำความเย็น ผลการดำเนินการพบว่าสามารถลดการใช้พลังงานของระบบเครื่องทำความเย็นลงได้ 47,484 kWh/ปี ส่งผลให้ต้นทุนด้านพลังงานโดยรวมลดลงประมาณ 227,923 บาท/ปี โดยไม่กระทบต่อคุณภาพสารเคลือบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Abdul Aziz [7] และ Jia [8] นอกจากนี้ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 28.42 ตัน CO₂/ปี (อ้างอิงจากค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่

ประมาณ 0.5986 kgCO₂/kWh [11]) ดังนั้นการประยุกต์ใช้แนวคิดสึนในการจัดการพลังงานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดต้นทุนการผลิต และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การติดตั้งระบบติดตามการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ (IoT) ยังช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถตรวจสอบและควบคุมการใช้พลังงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยการวิเคราะห์แนวโน้มการใช้พลังงานจากกราฟแสดงผลของระบบ IoT แสดงดังในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟแนวโน้มการใช้พลังงานของเครื่องทำความเย็น

จากกราฟพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยลดลงจาก 53.47 kW เหลือเพียง 37.2 kW และเมื่อนำมาพิจารณาค่าทางสถิติพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบ เท่ากับ 7.47 ซึ่งพิจารณาน้อยมากเมื่อเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของเครื่องทำความเย็น โดยความคลาดเคลื่อนรวมจากการวัดค่าของอุปกรณ์ในระบบ IoT เท่ากับร้อยละ 0.75 จากผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดสามารถส่งเสริมการมีส่วนร่วมของพนักงานในการจัดการพลังงาน และสนับสนุนการพัฒนาการใช้พลังงานอย่างยั่งยืนในภาคอุตสาหกรรม

5. ข้อเสนอแนะ

ปรับปรุงระบบควบคุมให้เป็นอัตโนมัติ ให้มีการติดตั้งระบบเซนเซอร์และเทคโนโลยี IIoT (Industrial Internet of Things) เพื่อตรวจสอบภาระการใช้งานและสถานะการทำงานของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตแบบเรียลไทม์ โดยนำข้อมูลดังกล่าวไปเชื่อมกับระบบให้มีการควบคุมแบบอัตโนมัติ การสลับการทำงานของคอมเพรสเซอร์ (Compressor Sequencing Control) และการปรับตั้งอุณหภูมิเครื่องทำความเย็น ตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เพื่อให้เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตและมีการควบคุมได้อย่างแม่นยำ โดยไม่พึ่งพาการปรับตั้งระบบแบบแมนนวลจากผู้ปฏิบัติงานเพียงอย่างเดียว

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Intellify Industry Report, “Thailand's Energy Industry Outlook 2025–2030,” Sep. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.intellifyglobal.com/thailand-energy-industry-outlook-2025/>. [Accessed Sep. 13, 2025]. (in Thai).
- [2] A. Rodphai and L. Sriratana, “Reducing Energy Use in Aluminum Furnaces by Applying Lean Energy Concepts: A Case Study of Seng Chun Asia Co., Ltd.,” in *Proceedings of the 21st Kasetsart University Kamphaeng Saen National Conference 2024*, Nakhon Pathom, Thailand, 2024, pp. 650–661 (in Thai).

- [3] S. Pimsakul, *Supply Chain Management*, Bangkok, Thailand, 2017 (in Thai).
- [4] S. Inthongkham, “Reducing the Specific Energy Consumption (SEC) By Increase in Overall Equipment Effectiveness (OEE) Case Study of Electrolytic De flash and Water Jet Machine” M. S. Independent Study, University of Chulalongkorn, Bangkok, 2022 (in Thai).
- [5] C. Wongwian, K. Sagulpongmalee, and C. Inyasri, “Propeller Mass Reduction of the Electric Motor in Ring-Spinning Machine in Textile Industry for Energy Saving,” *Thai Industrial Engineering Network Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 111–117, 2021 (in Thai).
- [6] W. Klinbun, R. Yadseang, N. Suchisong, and J. Klinbun, “Design of Sandblasting Machine to Reduce Waste in the Production of Motorcycle Exhaust Muffler,” *Manufacturing and Management Technology Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 1–8, 2024 (in Thai).
- [7] M. Abdul Aziz and R. Eddy Nugroho, “Reducing Electrical Power Consumption SEEC by 2 kWh/ton Cement and Increaseing Production Rate by 10–15 TPH through Diaphragm Slot Cleaning and Grinding Ball Addition in Chambers 1 and 2,” in *The Mercu Buana Ecobiz International Conference: Innovation and Operational Efficiency in Energy Business*, Jakarta, Indonesia, 2025, pp. 76–90.
- [8] S. Jia, S. Wang, W. Cai, J. Lv, S. Li, Z. S. Li, G. Zhou, and L. Hu, “Energy-Saving Strategy and Method of Spindle Deceleration During No-Load Operation of Machine Tools for Energy Lean Management,” *Energy Conversion and Management*, vol. 300, pp. 1–13, 2024.
- [9] J. Cosgrove, M. J. R. Duarte, J. Littlewood, and P. Wilgeroth, “An Energy Mapping Methodology to Reduce Energy Consumption in Manufacturing Operations,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 230, pp. 1–9, 2016.
- [10] L. Incipini, M. E. Mehtedi, T. Mancia, and P. Pierleoni, “IoT Network for Industrial Machine Energy Monitoring,” in *Proceedings of the International Conference on Advances in Education and Information Technology*, 2019, pp. 1–6.
- [11] Thai National LCI Database, “TIIS–MTEC–NSTDA (with TGO Electricity 2016–2018),” [Online]. Available: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=YhKdIpIVmpkSE5mWlcxcGMzTnBiMjQ9>. [Accessed Feb. 8, 2026]. (in Thai).

การศึกษาพารามิเตอร์การสแกนสามมิติต่อความคลาดเคลื่อนการวัดขนาดชิ้นงาน

วัสดุอะลูมิเนียม AA6063

A Study on the Effects of 3D Scanning Parameters on Dimensional Measurement Errors of Aluminum Alloy AA6063 Workpieces

กฤษณะ อ่วมนุสนธิ^{1*} ภาณุเดช แสงสีคำ¹ วรวิทย์ ปัญญาคำ¹ และ พิชัย จันทรมณี¹¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ 2 ถนนวงลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120Kritsana Uamnusun^{1*} Panudet Saengseedam¹ Voravee Punyakum¹ and Pichai Janmanee¹¹Rajamangala University of Technology Krungthep, 2 Nang Linchi Road, Thung Maha Mek, Sathon, Bangkok, 10120

*Corresponding author Email: kritsana.u@mail.rmutk.ac.th

(Received: June 4, 2026; Revise: June 24, 2026; Accepted: June 29, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์การสแกนสามมิติต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดชิ้นงานวัสดุอะลูมิเนียม AA6063 โดยทำการเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่องมือวัดแบบสัมผัส CMM Arm พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษได้แก่ Resolution 0.2, 0.6, 1 มิลลิเมตร และค่า Shutter 2, 5, 8 มิลลิวินาที ซึ่งถูกนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Regression Analysis) ผลการทดลองพบว่า ค่า Resolution มีผลต่อความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ p-value เท่ากับ 0.010 โดยเมื่อเพิ่มค่า Resolution จะส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า Shutter ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ p-value เท่ากับ 0.221 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการทดสอบ Lack-of-Fit ให้ค่า p-value เท่ากับ 0.764 แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมและน่าเชื่อถือในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การสแกน และค่าความคลาดเคลื่อน ผลการวิเคราะห์แผนภูมิพาเรโตยืนยันว่า Resolution เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความผิดพลาดของการสแกนสามมิติ ขณะที่ Shutter ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวจากข้อมูลการสแกนที่แสดงโครงข่ายตาข่ายซึ่งมีความหนาแน่นลดลงเมื่อค่า Resolution เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การสร้างรูปทรงเรขาคณิตบริเวณมุม ขอบ และพื้นผิวโค้งเกิดความคลาดเคลื่อนจากชิ้นงานต้นแบบ การวิเคราะห์ Response Optimization พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ Resolution เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร และ Shutter เท่ากับ 8 มิลลิวินาที ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดประมาณ 0.0099 มิลลิเมตร ผลการวิเคราะห์ Boxplot แสดงการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนและพบค่าผิดปกติบางตำแหน่ง ซึ่งอาจเกิดจากการสะท้อนของแสงที่กระเจิง สภาวะแวดล้อม และความหยาบผิวของวัสดุ ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสแกนสามมิติชิ้นงานอะลูมิเนียม AA6063 เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดเชิงมิติ หรืองานด้านวิศวกรรมย้อนกลับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การสแกนสามมิติ อะลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6063 พารามิเตอร์ที่เหมาะสม ความละเอียด ชัตเตอร์

Abstract

This study aims to investigate the effects of three-dimensional (3D) scanning parameters on dimensional measurement errors of aluminum alloy AA6063 components, with results compared against a contact-type coordinate measuring machine (CMM) arm. The scanning parameters examined include resolution values of 0.2, 0.6, and 1.0 mm, and shutter time values of 2, 5, and 8 ms. The relationships

between these parameters and measurement error were analyzed using linear regression analysis. The experimental results demonstrate that resolution has a statistically significant effect on dimensional error ($p = 0.010$), with increasing resolution values leading to increased measurement errors. Conversely, shutter time shows no statistically significant influence on measurement error ($p = 0.221$) at a significance level of 0.05. The lack-of-fit test yields a p-value of 0.764, confirming that the developed regression model is adequate and reliable for describing the relationship between scanning parameters and measurement error. Pareto chart analysis confirms that resolution is the dominant factor affecting 3D scanning error, whereas shutter time does not exhibit a significant effect. These findings are consistent with surface reconstruction data showing that mesh density decreases as resolution increases, resulting in geometric inaccuracies at corners, edges, and curved surfaces relative to the reference geometry. Response optimization analysis identifies the optimal parameter combination as 0.2 mm resolution and 8 ms shutter time, yielding a minimum dimensional error of approximately 0.0099 mm. Boxplot analysis reveals the distribution of measurement errors and identifies several outliers, which may be attributed to light scattering effects, environmental conditions, and surface roughness of the aluminum material. The findings of this study provide practical guidelines for determining appropriate scanning parameters for 3D scanning of aluminum AA6063 components to enhance dimensional measurement accuracy and effectiveness in reverse engineering applications.

Keywords: 3D Scanning, Aluminum Alloy AA6063, Parameter Optimization, Resolution, Shutter

1. บทนำ

การวัดขนาดชิ้นงานในกระบวนการผลิตมีความสำคัญอย่างมากต่อการควบคุมคุณภาพ และความแม่นยำของผลิตภัณฑ์ เครื่อง Coordinate Measuring Machine Arm (CMM Arm) เป็นเครื่องมือที่ให้ความแม่นยำสูง และนิยมใช้ในการตรวจสอบขนาดชิ้นงาน แต่การใช้งาน CMM Arm มักใช้เวลานาน ต้องใช้บุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญ มีราคาสูง และมีข้อจำกัดด้านความยืดหยุ่น โดยงานวิจัยของ Ksenia Ostrowska และคณะ [1] ที่ศึกษาการเปรียบเทียบความแม่นยำของเครื่องวัดพิกัดแขนกลเสมือนจริงโดยใช้แบบจำลองทางมาตรวิทยาที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ เปรียบเทียบข้อดีแต่ละแบบจำลอง พร้อมทั้งเสนอวิธีการตรวจสอบที่มีความน่าเชื่อถือเพื่อรับรองความถูกต้องของแบบจำลองเสมือนสำหรับงานควบคุมคุณภาพด้วยการวัดพิกัด Adam Gaska และคณะ [2] ศึกษาวิธีการง่ายๆ สำหรับการประเมินความแม่นยำเฉพาะงานของเครื่องวัดพิกัดแขนข้อต่อ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีการในงานวิจัยช่วยกำหนดความแม่นยำเฉพาะงานของ AACMM ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มขีดความสามารถในการนำอุปกรณ์ไปใช้งานวัดที่หลากหลายมากขึ้น และ Yaowei Sun พร้อมคณะ [3] วิเคราะห์ข้อผิดพลาดของเครื่องวัดพิกัดด้วยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 6 องศาอิสระที่ยึดหัววัดไว้ ผลการทดลองพบว่า ความเร็วที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 2 มม./วินาที หัววัดควรตั้งฉากกับพื้นผิวมากที่สุด และมีข้อผิดพลาดสูงสุด 0.1979 มม. กรณีศึกษานี้ช่วยเพิ่มความแม่นยำและนำไปประยุกต์ใช้ AACMM แบบอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรมมากขึ้น ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีการสแกนสามมิติ (3D Scanning) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น [4–5] เนื่องจากสามารถเก็บข้อมูลพื้นผิวของชิ้นงานได้รวดเร็ว สามารถวัดขนาดชิ้นงานผ่านโปรแกรมได้ และมีความครอบคลุม [6] แต่ความแม่นยำของการสแกนสามมิติขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่มีอยู่ในสองส่วนด้วยกัน คือ Resolution และ Shutter แต่ด้วยวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีความหลากหลาย ซึ่งทำให้การตั้งค่าพารามิเตอร์มีความแตกต่างกันและไม่มีความแม่นยำ เมื่อนำไปวัดหาความผิดพลาดในกระบวนการผลิต

Zainal Mukhriz และคณะ [7] ศึกษาการวิเคราะห์ความแม่นยำของเครื่องสแกน 3 มิติบนวัตถุขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องสแกน 3 มิติ GOM II ATOS Triple Scan ในการวัดขนาดของวัตถุขนาดเล็กที่ทำจากโลหะ โดยจะเปรียบเทียบการวัดแบบดิจิทัลจากเครื่องสแกน 3 มิติ กับการวัดโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ โดยพิจารณาชิ้นงานโลหะ 3 ชิ้นที่มีขนาดแตกต่างกันคือ เล็ก กลาง และใหญ่ ผลพบว่าค่าความคลาดเคลื่อน และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) มีความคลาดเคลื่อนแตกต่างกันตามขนาดชิ้นงาน โดยชิ้นงานขนาดกลางมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด จึงชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการสอบเทียบ การเตรียมพื้นผิว และการควบคุมสภาพแวดล้อม ศักยภาพ และข้อจำกัดของเทคโนโลยีสแกน 3 มิติ สำหรับงานวิศวกรรมที่ต้องการความแม่นยำสูง Dorota Kustrzycka และคณะ [8] ศึกษาการเปรียบเทียบความแม่นยำของภาพ 3 มิติที่ได้จากเครื่องสแกนประเภทต่างๆ พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแม่นยำ ได้แก่ ประเภทวัสดุ ประสบการณ์ผู้ใช้งาน เทคนิคการสแกน โดยตรง และโดยอ้อม รวมถึงความสามารถในการทำซ้ำ การสแกนโดยตรงมีความสามารถในการทำซ้ำใกล้เคียงกับการสแกนโดยอ้อม เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานทันตกรรมดิจิทัล และด้วยอะลูมิเนียมเกรด AA6063 เป็นโลหะที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมต่างๆ [9–11] เพราะสามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีคุณสมบัติป้องกันการกัดกร่อน น้ำหนักเบา มีการนำความร้อนดี คงทนต่อสภาพแวดล้อมทั่วไป ไม่มีไม่มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีความหนาแน่น มีโครงสร้างที่สม่ำเสมอ และมีพื้นผิวสวยเรียบด้าน มันวาวแบบโลหะด้านๆ มีค่าการสะท้อนแสงประมาณ 60–75% เมื่อเทียบกับกระจกเงา [12–13] คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสแกนวัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของพารามิเตอร์ในการสแกนสามมิติต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดชิ้นงานอะลูมิเนียม AA6063 โดยเปรียบเทียบกับผลการวัดจากเครื่อง CMM Arm

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในการดำเนินงานวิจัย

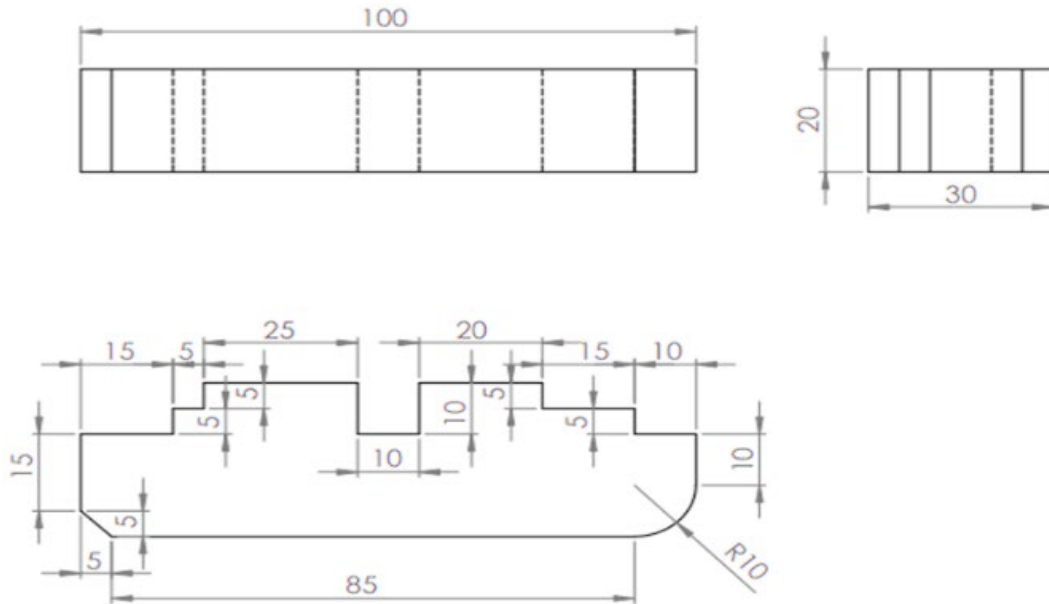
ผู้วิจัยศึกษาข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานสแกนสามมิติรวมถึงวิธีการใช้งานเครื่องสแกนสามมิติ รุ่น HandySCAN 700 แปรพันธ์ CREAFORM จากประเทศแคนาดา ดังรูปที่ 1 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บภาพรายละเอียดจากวัตถุ โดยทำการสแกน หรือ เก็บข้อมูล และหลังจากนั้นจะถูกส่งจากเครื่องสแกนเนอร์เข้าไปสู่คอมพิวเตอร์ในลักษณะสามเหลี่ยม (Polygon) หลังจากนั้นแปลงข้อมูลเป็น Surface และนำข้อมูลไปสร้างเป็นชิ้นงาน โดยเครื่องจะยิงเลเซอร์ออกจากเครื่อง และรอเลเซอร์สะท้อนจากวัตถุกลับเข้าไปสแกนเนอร์ ซึ่งตัวเครื่องมีการตั้งค่าหลักอยู่ 2 พารามิเตอร์ คือ Resolution กับ Shutter



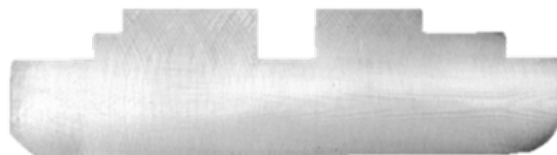
รูปที่ 1 เครื่องสแกนสามมิติ รุ่น HandySCAN 700

2.2 ชิ้นงานทดสอบ

ผู้วิจัยดำเนินการสร้างชิ้นงานทดสอบตามแบบดังรูปที่ 2 ด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC) โดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063 ซึ่งออกแบบมาให้ชิ้นงานมีรู เพื่อควบคุมตัวแปร และมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของ พารามิเตอร์พื้นผิวระนาบ ขอบ และส่วนโค้งภายนอกเป็นหลัก จึงดำเนินการสร้างโดยที่ชิ้นงานทดสอบไม่มีรู ดังรูปที่ 3 ดำเนินการสร้างด้วยเครื่องกัด Computer Numerical Control (CNC)



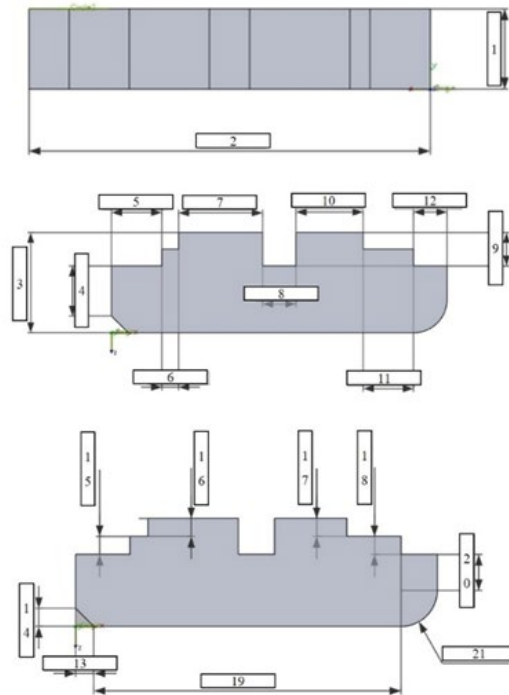
รูปที่ 2 แบบชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบอะลูมิเนียมเกรด AA6063

2.3 ออกแบบการทดสอบ

1) ผู้วิจัยออกแบบการเก็บข้อมูลด้วยการตรวจสอบขนาดชิ้นงานจำนวน 21 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4 ใช้เครื่องมือ ในการตรวจสอบที่มีความความน่าเชื่อถือ คือ เครื่อง Coordinate Measuring Machine Arm (CMM Arm) 6 แกน ในการตรวจวัดขนาด เพื่อใช้ค่าที่วัดได้เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบผลของการสแกนสามมิติ โดยการตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องสแกนสามมิติที่ต่างกันในการทดสอบคือ Resolution 0.2, 0.6, 1 มิลลิเมตร และ Shutter 2, 5, 8 มิลลิวินาที เนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่องสแกนสามมิติการตั้งค่า Resolution อยู่ในช่วง 0.2–0.8 มิลลิเมตร และค่า Shutter อยู่ในช่วง 2–8 มิลลิวินาที เพื่อให้ครอบคลุมทั้งสภาวะการสแกนที่มีความหนาแน่นของจุดข้อมูลต่ำจนถึงสูง รวมถึงครอบคลุมช่วงเวลาการรับแสงที่เหมาะสมสำหรับพื้นผิวโลหะอะลูมิเนียม AA6063 [14–17] โดยทำงานร่วมกับโปรแกรม Geomagic Control X ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นำไฟล์สแกนเข้าสู่โปรแกรมแล้วนำผลการสแกนวัดขนาดกับไฟล์ CAD ที่วัดได้จากเครื่องมือวัด CMM Arm



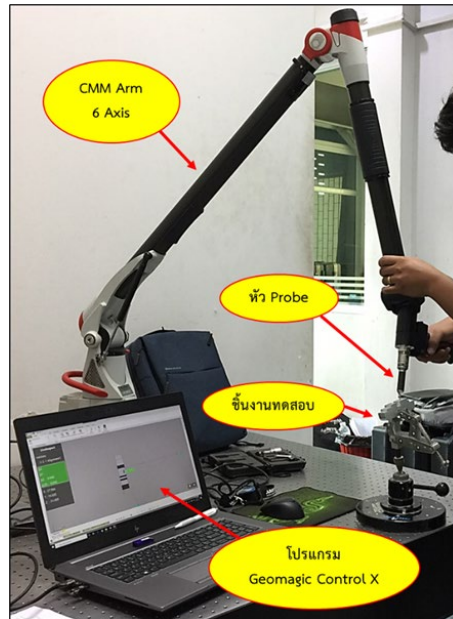
รูปที่ 4 ตำแหน่งทดสอบการวัดขนาดชิ้นงาน

2) การวิเคราะห์ทางสถิติ งานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ข้อมูลผลการทดลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab โดยการวิเคราะห์ เพื่อใช้ศึกษาผลของพารามิเตอร์ในการสแกนสามมิติต่อความคลาดเคลื่อนการวัดขนาด โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Regression Analysis) ใส่ค่าการตอบสนอง (Responses) คือค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการสแกนแต่ละพารามิเตอร์เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัดแบบสัมผัส CMM Arm ซึ่งคำนวณจากค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้จากการสแกนสามมิติและค่ามาตรฐานที่วัดได้จากเครื่อง CMM Arm เป็นไปดังสมการที่ 1 ตัวแปรพยากรณ์แบบต่อเนื่อง Continuous predictors ใส่ค่า Resolution และ Shutter ซึ่งแต่ละปัจจัยกำหนดไว้ 3 ระดับ ได้แก่ Resolution 0.2, 0.6 และ 1.0 มิลลิเมตร กับ Shutter 2, 5 และ 8 มิลลิวินาที จากตำแหน่งการวัดจำนวน 21 ตำแหน่ง เพื่อประเมินผลของปัจจัยหลัก และผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ค่า $\alpha = 0.05$ และวิเคราะห์ Response Optimization เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสามมิติวัดอะลูมิเนียมเกรด AA6063 นอกจากนี้ยังใช้แผนภูมิพาเรโต้ เพื่อแสดงแนวโน้มของผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ต่อค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาด และใช้ Boxplot เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลว่ามีความน่าเชื่อถือหรือไม่

$$Error = Dimension_{CMM\ arm} - Dimension_{Scan\ 3D} \quad (1)$$

2.4 ตรวจสอบขนาดชิ้นงานทดสอบด้วย Coordinate Measuring Machine Arm (CMM Arm)

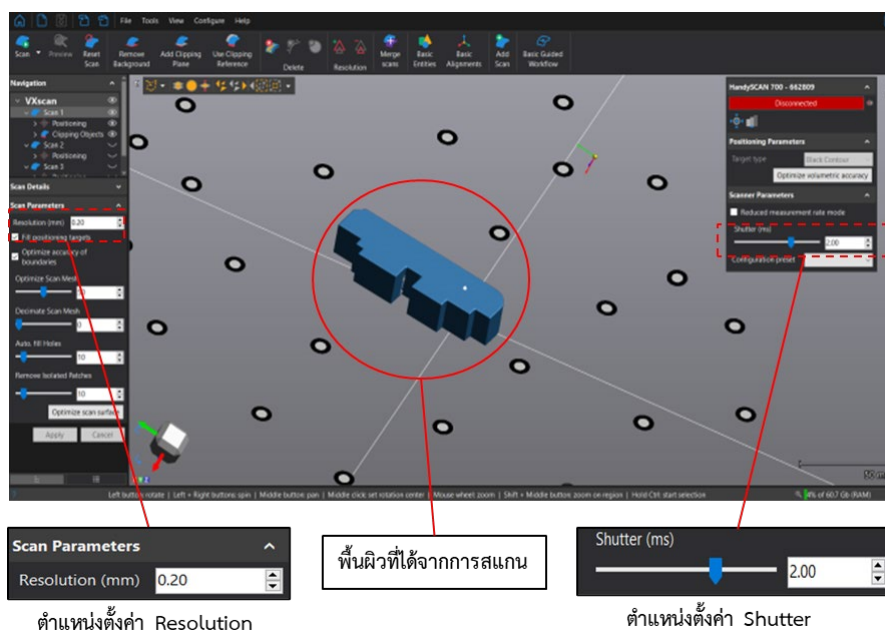
ในการตรวจสอบขนาดลำดับแรกเพื่อหาค่ามาตรฐานที่ใช้ในการอ้างอิงขนาดชิ้นงานเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานสแกนสามมิติที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างกัน โดยใช้เครื่อง Coordinate Measuring Machine Arm (CMM Arm) แบบ 6 แกน โดยตัวเครื่องวัดประเภทนี้ สามารถวัดขนาดชิ้นงานได้อย่างละเอียด และครอบคลุมวัดชิ้นงานได้รอบด้าน มีความละเอียดของเครื่องอยู่ที่ 0.001 มิลลิเมตร มีความแม่นยำสูง และเป็นเครื่องมือวัดที่มีความน่าเชื่อถือ ใช้ระบบแบบสัมผัส (Touch probe) ทำให้มีความแม่นยำที่สูง โดยทำการวัดขนาดตามแบบงาน 21 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3 และทำงานร่วมกับโปรแกรม Geomagic Control X ซึ่งเป็นโปรแกรมใช้ตรวจสอบด้านขนาดโดยเฉพาะ ทำงานภายใต้ห้องปฏิบัติการวัด ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตรวจสอบขนาดชิ้นงานทดสอบด้วย CMM Arm

2.5 ตรวจสอบขนาดชิ้นงานทดสอบด้วยการสแกนสามมิติ

การสแกนสามมิติในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้เครื่องสแกนสามมิติรุ่น HandySCAN700 ทำงานร่วมกับโปรแกรม VXelements ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการสแกน 3 มิติ เพื่อเก็บข้อมูลในรูปแบบตาข่าย (Mesh) โดยกำหนดการตั้งพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันคือ Resolution 0.2, 0.6 และ 1.0 มิลลิเมตร กับ Shutter 2, 5 และ 8 มิลลิวินาที ดังรูปที่ 6 โดยมีค่าคงที่ คือ Optimize Scan Mesh 50 เปอร์เซ็นต์, Auto Fill Holes 10 เปอร์เซ็นต์ และ Remove Isolated Patches 10 เปอร์เซ็นต์ ทำการสแกนชิ้นงานครบทุกด้านหลังจากนั้นนำไฟล์ STL ที่ได้จากผลการสแกนเข้าสู่โปรแกรม Geomagic Control X เพื่อวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับ CAD ไฟล์ที่ได้จากการวัด CMM arm โดยทำการวัดทั้งหมด 21 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4 หน้าที่ 5



รูปที่ 6 การตั้งพารามิเตอร์ Resolution กับ Shutter

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบวัดขนาด CMM Arm

ผลการทดสอบการวัดขนาดชิ้นงานทดสอบที่ผลิตด้วยวัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063 ด้วยเครื่องมือวัดแบบสัมผัส 6 แกน (Coordinate Measuring Machine: CMM Arm) ได้ดำเนินการวัดจำนวนทั้งหมด 21 ตำแหน่งบนชิ้นงาน โดยผลการวัดรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1 ค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง CMM Arm ในการศึกษาถูกกำหนดให้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิง (Reference Value) สำหรับใช้ในการเปรียบเทียบและประเมินความถูกต้องของผลการวัดจากกระบวนการสแกนสามมิติที่พารามิเตอร์ต่างกันในช่วงตอนถัดไปของการวิจัย

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบวัดขนาดชิ้นงานทดสอบ อะลูมิเนียมเกรด AA6063 ด้วยเครื่อง CMM Arm

ผลการทดสอบวัดขนาด CMM Arm	
Position	Dimension Drawing (mm)
Linear Dim.1	19.972
Linear Dim.2	99.86
Linear Dim.3	29.954
Linear Dim.4	15.05
Linear Dim.5	14.991
Linear Dim.6	5.001
Linear Dim.7	24.836
Linear Dim.8	10.133
Linear Dim.9	10.004
Linear Dim.10	19.873
Linear Dim.11	14.957
Linear Dim.12	10.018
Linear Dim.13	4.899
Linear Dim.14	4.895
Linear Dim.15	5.006
Linear Dim.16	5
Linear Dim.17	4.989
Linear Dim.18	5.008
Linear Dim.19	85.079
Linear Dim.20	10.04
Radial Dim.1	R 9.821

3.2 ผลการทดสอบสแกนสามมิติ

ผลการทดสอบการวัดขนาดชิ้นงานทดสอบที่ผลิตด้วยวัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063 ด้วยเครื่องมือวัดแบบสแกนสามมิติที่พารามิเตอร์ต่างกัน 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ Resolution 0.2, 0.6 และ 1.0 กับ Shutter 2, 5 และ 8 มิลลิวินาที ทดสอบวัดค่าทั้งหมด 21 ตำแหน่ง และนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดขนาด CMM Arm พบว่า Resolution 0.2 Shutter 2 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.05 มิลลิเมตร, Resolution 0.2 Shutter 5 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.092 มิลลิเมตร, Resolution 0.2 Shutter 8 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.081 มิลลิเมตร, Resolution 0.6 Shutter 2 มีค่าเฉลี่ย

ความคลาดเคลื่อน 0.179 มิลลิเมตร, Resolution 0.6 Shutter 5 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.115 มิลลิเมตร, Resolution 0.6 Shutter 8 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.133 มิลลิเมตร, Resolution 1 Shutter 2 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.454 มิลลิเมตร, Resolution 1 Shutter 5 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.253 มิลลิเมตร, Resolution 1 Shutter 8 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.316 มิลลิเมตร รายละเอียดข้อมูลการทดสอบเป็นไปดังตารางที่ 2 ถึง 4

ตารางที่ 2 ผลการสแกนสามมิติ Resolution 0.2 วัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063 เปรียบเทียบกับผล CMM Arm

Position	Dimension CMM Arm (mm)	Resolution 0.2 mm					
		Shutter 2 ms		Shutter 5 ms		Shutter 8 ms	
		Dimension	Scan Errors	Dimension	Scan Errors	Dimension	Scan Errors
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Linear Dim.1	19.972	20.168	0.196	20.247	0.275	20.164	0.192
Linear Dim.2	99.86	99.901	0.041	99.916	0.056	99.918	0.058
Linear Dim.3	29.954	29.964	0.01	29.972	0.018	30.003	0.049
Linear Dim.4	15.05	15.048	0.002	15.034	0.016	15.031	0.019
Linear Dim.5	14.991	15.143	0.152	15.137	0.146	15.17	0.179
Linear Dim.6	5.001	5.094	0.093	5.071	0.07	5.036	0.035
Linear Dim.7	24.836	24.808	0.028	24.834	0.002	24.859	0.023
Linear Dim.8	10.133	10.093	0.04	10.086	0.047	10.083	0.05
Linear Dim.9	10.004	10.018	0.014	10.018	0.014	10.027	0.023
Linear Dim.10	19.873	19.88	0.007	19.863	0.01	19.9	0.027
Linear Dim.11	14.957	15.006	0.049	15.09	0.133	15.014	0.057
Linear Dim.12	10.018	10.066	0.048	10.199	0.181	10.12	0.102
Linear Dim.13	4.899	4.871	0.028	4.898	0.001	4.853	0.046
Linear Dim.14	4.895	4.882	0.013	4.892	0.003	4.882	0.013
Linear Dim.15	5.006	4.96	0.046	4.938	0.068	4.84	0.166
Linear Dim.16	5	5.007	0.007	5.005	0.005	5.004	0.004
Linear Dim.17	4.989	4.998	0.009	5	0.011	5.008	0.019
Linear Dim.18	5.008	5.013	0.005	5.012	0.004	5.016	0.008
Linear Dim.19	85.079	84.931	0.148	84.539	0.54	84.783	0.296
Linear Dim.20	10.04	9.987	0.053	9.895	0.145	9.911	0.129
Radial Dim.21	R 9.821	R 9.878	0.057	R 10.005	0.184	R 10.021	0.2
Sum Errors			1.046		1.929		1.695
Average Errors			0.05		0.092		0.081

ตารางที่ 3 ผลการสแกนสามมิติ Resolution 0.6 วัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063 เปรียบเทียบกับผล CMM Arm

Position	Dimension CMM Arm (mm)	Resolution 0.6 mm					
		Shutter 2 ms		Shutter 5 ms		Shutter 8 ms	
		Dimension	Errors	Dimension	Errors	Dimension	Errors
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Linear Dim.1	19.972	20.692	0.72	20.461	0.489	20.554	0.582
Linear Dim.2	99.86	99.896	0.036	99.902	0.042	99.923	0.063
Linear Dim.3	29.954	29.963	0.009	29.996	0.042	29.961	0.007
Linear Dim.4	15.05	15.065	0.015	15.091	0.041	15.059	0.009
Linear Dim.5	14.991	15.39	0.399	15.076	0.085	15.175	0.184
Linear Dim.6	5.001	5.278	0.277	5.017	0.016	5.069	0.068
Linear Dim.7	24.836	24.681	0.155	24.872	0.036	24.843	0.007
Linear Dim.8	10.133	10.08	0.053	10.078	0.055	10.075	0.058
Linear Dim.9	10.004	10.019	0.015	10.021	0.017	10.019	0.015
Linear Dim.10	19.873	19.899	0.026	19.892	0.019	19.865	0.008
Linear Dim.11	14.957	15.159	0.202	15.131	0.174	15.163	0.206
Linear Dim.12	10.018	10.344	0.326	10.279	0.261	10.33	0.312
Linear Dim.13	4.899	4.883	0.016	4.874	0.025	4.823	0.076
Linear Dim.14	4.895	4.88	0.015	4.883	0.012	4.827	0.068
Linear Dim.15	5.006	4.862	0.144	4.996	0.01	5.03	0.024
Linear Dim.16	5	5.01	0.01	5.023	0.023	5.023	0.023
Linear Dim.17	4.989	4.995	0.006	5.005	0.016	4.995	0.006
Linear Dim.18	5.008	5.012	0.004	5.004	0.004	5.019	0.011
Linear Dim.19	85.079	84.02	1.059	84.21	0.869	84.143	0.936
Linear Dim.20	10.04	9.899	0.141	9.97	0.07	9.975	0.065
Radial Dim.21	R 9.821	R 9.957	0.136	R 9.926	0.105	R 9.880	0.059
Sum Errors			3.764		2.411		2.787
Average Errors			0.179		0.115		0.133

ตารางที่ 4 ผลการสแกนสามมิติ Resolution 1 วัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063 เปรียบเทียบกับผล CMM Arm

Position	Dimension CMM Arm (mm)	Resolution 1 mm					
		Shutter 2 ms		Shutter 5 ms		Shutter 8 ms	
		Dimension	Errors	Dimension	Errors	Dimension	Errors
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Linear Dim.1	19.972	21.011	1.039	21.063	1.091	21.089	1.117
Linear Dim.2	99.86	99.891	0.031	99.907	0.047	99.897	0.037
Linear Dim.3	29.954	29.962	0.008	29.968	0.014	29.958	0.004
Linear Dim.4	15.05	15.046	0.004	15.023	0.027	14.969	0.081
Linear Dim.5	14.991	15.238	0.247	15.794	0.803	14.722	0.269
Linear Dim.6	5.001	4.984	0.017	5.279	0.278	4.978	0.023
Linear Dim.7	24.836	24.906	0.07	24.685	0.151	24.904	0.068
Linear Dim.8	10.133	10.038	0.095	10.06	0.073	10.092	0.041
Linear Dim.9	10.004	10.011	0.007	10.023	0.019	10.016	0.012
Linear Dim.10	19.873	19.849	0.024	19.851	0.022	19.809	0.064
Linear Dim.11	14.957	15.581	0.624	15.396	0.439	15.152	0.195
Linear Dim.12	10.018	11.334	1.316	10.491	0.473	10.261	0.243
Linear Dim.13	4.899	4.88	0.019	4.852	0.047	4.86	0.039
Linear Dim.14	4.895	4.851	0.044	4.914	0.019	4.909	0.014
Linear Dim.15	5.006	4.988	0.018	4.866	0.14	4.711	0.295
Linear Dim.16	5	5.05	0.05	5.015	0.015	5.026	0.026
Linear Dim.17	4.989	4.982	0.007	5	0.011	5.002	0.013
Linear Dim.18	5.008	5.016	0.008	4.989	0.019	5.002	0.006
Linear Dim.19	85.079	79.454	5.625	83.576	1.503	84.28	0.799
Linear Dim.20	10.04	9.908	0.132	9.995	0.045	9.979	0.061
Radial Dim.21	R 9.821	R 9.977	0.156	R 9.898	0.077	R 9.886	0.065
Sum Errors			9.541		5.313		3.472
Average Errors			0.454		0.253		0.316

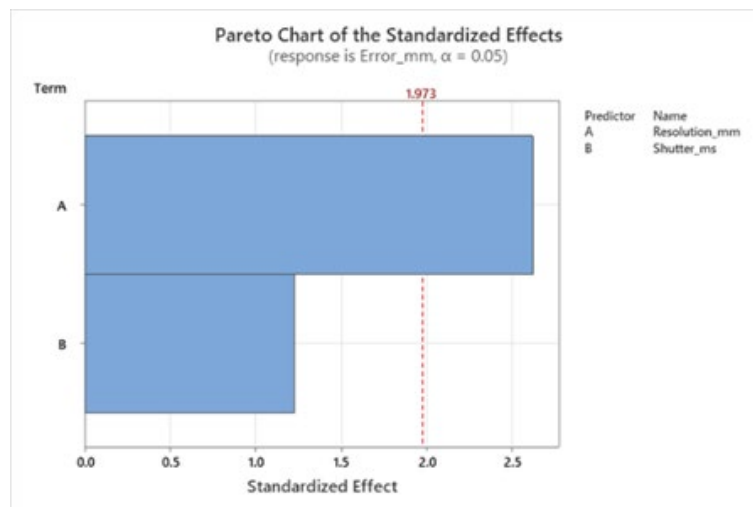
3.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบวิเคราะห์ผลการทดสอบผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรม Minitab โดยเลือกใช้เครื่องมือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Regression Analysis) ผลการวิเคราะห์การถดถอยแสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับพารามิเตอร์การสแกนดังสมการที่ 2 จากค่าสัมประสิทธิ์จะพบว่า Resolution ของการสแกนมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก แสดงว่าการเพิ่มค่า Resolution มากขึ้นส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นโดยมีแนวโน้มอย่างชัดเจน และมีนัยสำคัญทางสถิติที่ p-value เท่ากับ 0.010 ในขณะที่ค่า Shutter มีค่า p-value เท่ากับ 0.221 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนการสแกนสามมิติ และผล Lack-of-Fit ให้ค่า p-value เท่ากับ 0.764 ซึ่งค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าสมการเชิงคณิตศาสตร์ (Math Equation Model) มีความน่าเชื่อถือเหมาะสมต่อการเปรียบเทียบกับค่าวัดจริงต่อการเกิดความผิดพลาดจากค่าวัด ดังตารางที่ 5

$$\text{Error} = 0.0911 + 0.271 \text{ Resolution} - 0.0169 \text{ Shutter} \quad (2)$$

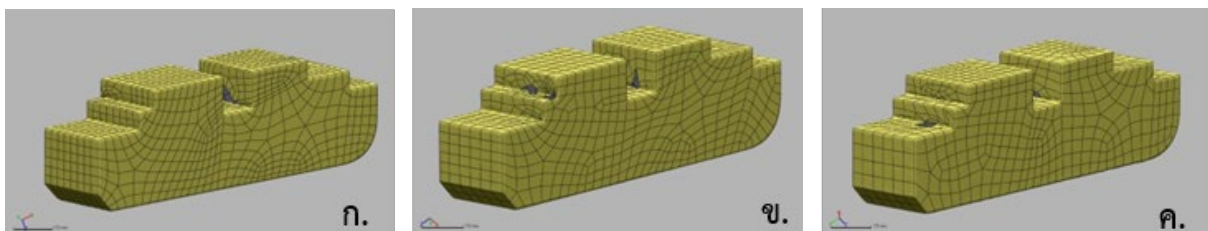
ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	1.8048	0.9024	4.18	0.017
Resolution	1	1.4801	1.4801	6.86	0.010
Shutter	1	0.3248	0.3248	1.51	0.221
Error	186	40.1287	0.2157		
Lack-of-Fit	6	0.7319	0.1220	0.56	0.764
Pure Error	180	39.3969	0.2189		
Total	188	41.9335			

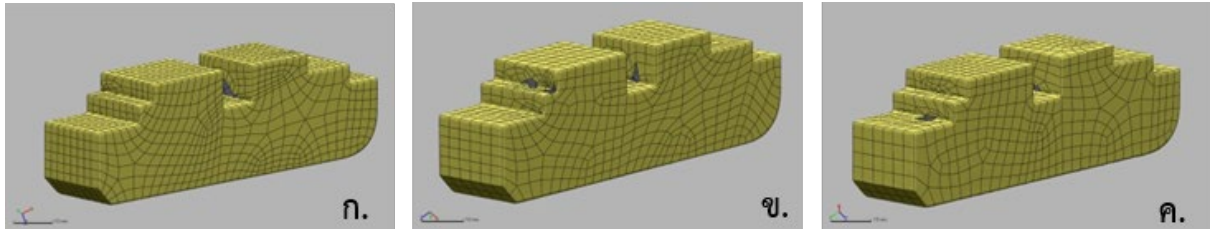


รูปที่ 7 แผนภูมิพาร์โรว์ที่มีผลกระทบต่อการสแกนสามมิติ

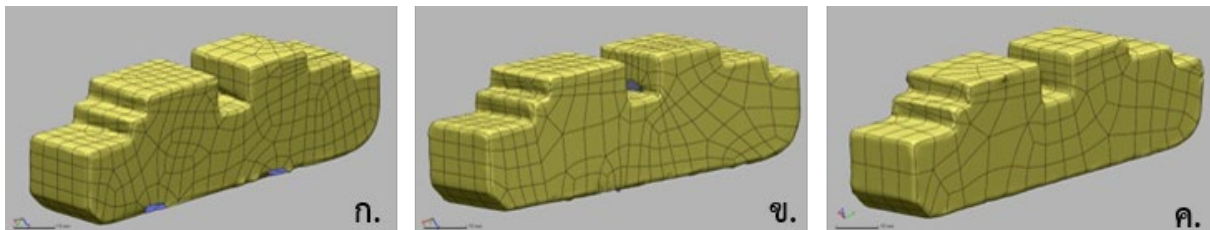
จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าการตั้งค่าพารามิเตอร์ Resolution (A) มีผลต่อค่า Error ในการสแกนสามมิติ เนื่องจากแท่งกราฟ (Bar) เกินกว่าเส้นอ้างอิง (Reference Line) ในแนวตั้ง ที่มีค่า 1.973 ในขณะที่พารามิเตอร์ Shutter (B) ไม่มีผลต่อค่า Error เนื่องจากแท่งกราฟ (Bar) ไม่เกินกว่าเส้นอ้างอิง (Reference Line) ในแนวตั้ง ที่มีค่า 1.973 ซึ่งสอดคล้องกันกับผลลัพธ์เชิงสถิติ ANOVA และยังสามารถสอดคล้องกับพื้นผิวที่ได้จากการสแกนสามมิติที่อยู่ในรูปแบบ Surface Fire พื้นผิวของชิ้นงานที่ได้จากการสแกนสามมิติแสดงในลักษณะโครงข่ายตาข่าย (mesh) ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยลงตามค่า Resolution ที่เพิ่มขึ้นของการสแกน โดยความหนาแน่นของตาข่ายน้อยลงส่งผลให้รูปทรงเรขาคณิตบริเวณมุม ขอบ และพื้นผิวโค้ง ไม่ได้ผลตามตัวอย่างต้นแบบการสแกน ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก CMM Arm ดังรูปที่ 8 ถึง 10



รูปที่ 8 ก. Resolution 0.2 Shutter 2, ข. Resolution 0.2 Shutter 5, ค. Resolution 0.2 Shutter 8

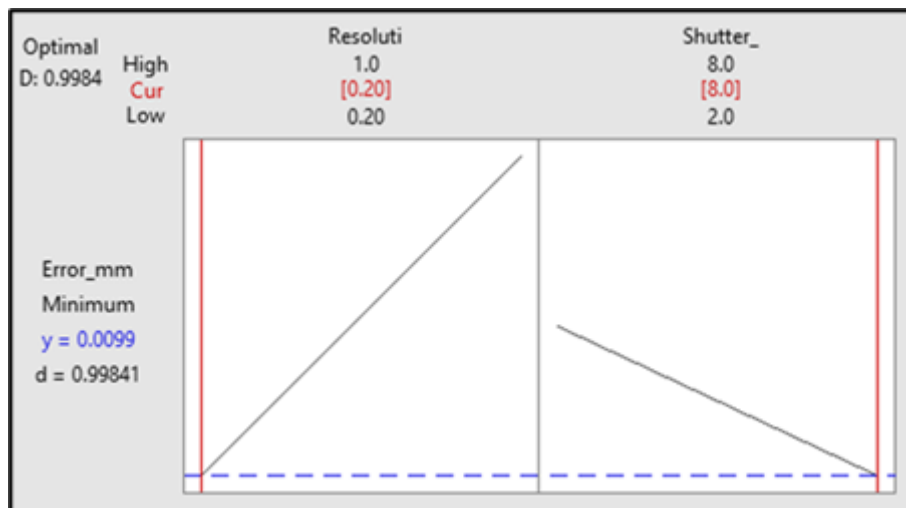


รูปที่ 9 ก. Resolution 0.6 Shutter 2, ข. Resolution 0.6 Shutter 5, ค. Resolution 0.6 Shutter 8

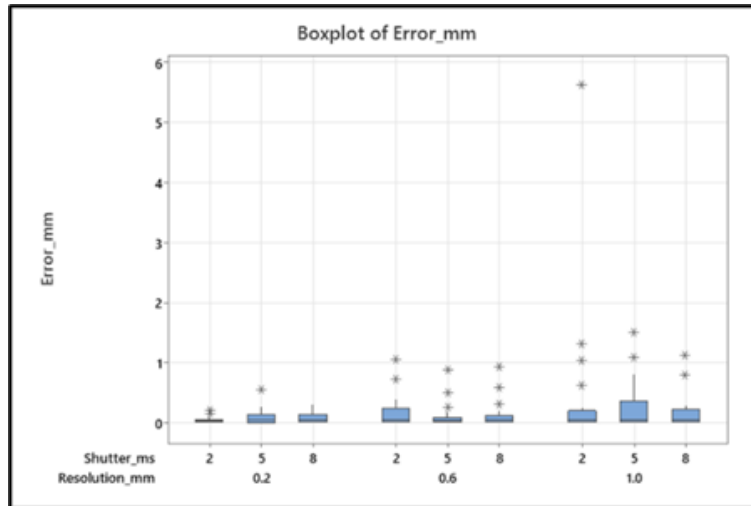


รูปที่ 10 ก. Resolution 1 Shutter 2, ข. Resolution 1 Shutter 5, ค. Resolution 1 Shutter 8

การวิเคราะห์ Response Optimization เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด และเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการสแกนสามมิติอะลูมิเนียมเกรด AA6063 พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ Resolution เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร และ Shutter เท่ากับ 8 มิลลิวินาที ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่คาดการณ์ต่ำมาก ความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.0099 มิลลิเมตร และมีค่าพึงพอใจ (Desirability) สูงถึง 0.998 แสดงถึงประสิทธิภาพของการเลือกใช้พารามิเตอร์ Resolution 0.2 และ Shutter 8 ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 Response Optimization: Error_mm



รูปที่ 12 Boxplot ของค่าความคลาดเคลื่อนการสแกนสามมิติ

4. อภิปรายผล

การสแกนสามมิติเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการใช้งานด้านมาตรวิทยา (Metrology) และวิศวกรรมย้อนกลับ เนื่องจากสามารถสร้างข้อมูล Point Cloud ที่มีรายละเอียดสูงสำหรับการวิเคราะห์รูปทรง และขนาดของชิ้นงาน จากการวิเคราะห์ด้วย Response Optimization การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการสแกนสามมิติอะลูมิเนียมเกรด AA6063 พบว่าพารามิเตอร์ที่ให้ความคลาดเคลื่อนต่ำสุด คือ Resolution 0.2 มิลลิเมตร และ Shutter 8 มิลลิวินาที ซึ่งแนวโน้มจะเห็นได้ว่าเมื่อ Resolution สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นตาม แต่ Shutter ยิ่งต่ำลงส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zainal Mukhriz และคณะ ที่พบว่า การสแกนสามมิติมีข้อจำกัดในด้านความแม่นยำ และต้องควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น การเตรียมผิว การตั้งค่า และสภาพแวดล้อม เพื่อให้ได้ผลการวัดที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดด้วยเครื่องมือวัดแบบเดิม นอกจากนี้ Kustrzycka และคณะ แสดงให้เห็นว่าความถูกต้องของสแกนขึ้นอยู่กับเทคนิคการสแกน การตั้งค่าการสแกน และชนิดของพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการวัดกับ CMM Arm ซึ่งจากงานวิจัย Adam Gąska และคณะ จะพบได้ว่าการใช้เครื่องมือวัดประเภท CMM นั้นมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการอ้างอิง และเปรียบเทียบผลกับเครื่องมือวัดอื่นได้อย่างมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งสอดคล้องกับแผนภูมิพาเรโต

5. สรุป

ผลของการศึกษาพารามิเตอร์การสแกนสามมิติต่อความคลาดเคลื่อนการวัดขนาดชิ้นงานวัสดุอะลูมิเนียม AA6063 เปรียบเทียบกับเครื่องวัดพิทช์แบบสัมผัส CMM Arm สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าค่าความละเอียดของการสแกน (Resolution) มีผลต่อความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.010$) ในขณะที่ค่าเวลาการเปิดรับแสง (Shutter) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.221$)

5.2 ผลการทดสอบ Lack-of-Fit ให้ค่า p -value เท่ากับ 0.764 แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสม และสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การสแกนกับค่าความคลาดเคลื่อนได้อย่างน่าเชื่อถือ

5.3 ผลการวิเคราะห์แผนภูมิพาเรโตสามารถยืนยันว่าพารามิเตอร์ Resolution เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของการสแกนสามมิติ ขณะที่ Shutter ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญภายในช่วงการทดลองที่กำหนด

5.4 การวิเคราะห์พื้นผิวจากแบบจำลองสามมิติพบว่า Resolution ส่งผลต่อความหนาแน่นของโครงข่ายตาข่าย (Mesh) ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการถ่ายทอดรายละเอียดของรูปทรงเรขาคณิต โดยเฉพาะบริเวณมุม ขอบ และพื้นผิวโค้งของชิ้นงาน

5.5 การวิเคราะห์ Response Optimization พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ Resolution 0.2 มิลลิเมตร และ Shutter 8 มิลลิวินาที ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดประมาณ 0.0099 มิลลิเมตร เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในการสแกนชิ้นงานอะลูมิเนียม AA6063

5.6 การกระจายตัวของข้อมูลจาก Boxplot พบค่าผิดปกติบางตำแหน่ง ซึ่งอาจเกิดจากการสะท้อนและการกระเจิงของแสงบนพื้นผิวอะลูมิเนียม รวมถึงผลของความหยาบผิวที่ส่งผลต่อการตรวจจับแสงของระบบ Structured Light ซึ่งวัสดุอะลูมิเนียม AA6063 มีคุณสมบัติสะท้อนแสงค่อนข้างสูง อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์แสงกระเจิง และการสะท้อนแบบผสมเมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบบนพื้นผิวอะลูมิเนียม บางส่วนจะสะท้อนเข้าสู่เซนเซอร์โดยตรง ขณะที่บางส่วนจะกระเจิงไปหลายทิศทาง ทำให้ตำแหน่งของลวดลายแสงที่กล้องตรวจจับได้ไม่ตรงกับตำแหน่งจริงบนพื้นผิว

ทั้งนี้ ผลการวิจัยสามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบสแกนสามมิติที่ใช้หลักการ Structured Light หรือเลเซอร์ที่มีช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกัน และเหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่ไม่มีการพันสารลดการสะท้อนบนพื้นผิว

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณคณาจารย์ชาววิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่สนับสนุนเครื่องมือ สถานที่ การทำวิจัย และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้ข้อมูล และคำปรึกษาจนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงลงได้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Ostrowska, A. Gąska, R. Kupiec, K. Gromczak, P. Wojakowski, and J. Śladek, “Comparison of Accuracy of Virtual Articulated Arm Coordinate Measuring Machine Based on Different Metrological Models,” *Measurement*, vol. 129, pp. 320–332, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.10.024.
- [2] A. Gąska, P. Gąska, W. Harmatys, M. Gruza, and J. Śladek, “Simple Method for Articulated Arm Coordinate Measuring Machines Task-Specific Accuracy Assessment,” *Measurement: Sensors*, vol. 18, p. 100158, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.measen.2021.100158.
- [3] Y. Sun, L. Lu, F. Wu, S. Xiao, J. Sha, and L. Zhang, “Error Analysis of a Coordinate Measuring Machine with a 6-DOF Industrial Robot Holding the Probe,” *Actuators*, vol. 12, no. 4, p. 173, Apr. 2023, doi: 10.3390/act12040173.
- [4] Allied Market Research, “3D Scanning Market Statistics and Industry Forecast,” Allied Market Research, n.d. [Online]. Available: <https://www.alliedmarketresearch.com/3d-scanning-market> (accessed Jan. 24, 2026).
- [5] Grand View Research, “Asia Pacific 3D Scanning Market Size & Outlook, 2025–2030,” Grand View Research, n.d. [Online]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/3d-scanning-market/asia-pacific> (accessed Jan. 24, 2026).

- [6] T. Usupan and P. Prempraneerach, “Performance Enhancement Mechanism of Laser Scanner for 3D Surface Reconstruction,” *Frontiers in Engineering Innovation Research*, vol. 16, no. 2, pp. 23–35, 2018.
- [7] Z. Mukhriz, M. Mukhsin, and I. A. Ishak, “Accuracy Analysis of a 3D Scanner on Small Dimension Object,” *Progress in Engineering Application and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 814–824, 2025, doi: 10.30880/peat.2025.06.01.087.
- [8] D. Kustrzycka, T. Marschang, M. Mikulewicz, and W. Grzebieluch, “Comparison of the Accuracy of 3D Images Obtained from Different Types of Scanners,” *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2020, Article ID 8854204, 2020, doi: 10.1155/2020/8854204.
- [9] The Aluminum Association, *International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys*, Arlington, VA, USA: The Aluminum Association, 2018.
- [10] AZoM, “Aluminium 6063 – Specifications, Properties, Classifications and Classes,” AZoM, Sep. 12, 2013. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2812> (accessed Jan. 24, 2026).
- [11] J. R. Davis, *Aluminum and Aluminum Alloys*, Materials Park, OH, USA: ASM International, 1993, pp. 351–416.
- [12] Aluminium Shop Online, “Knowledge Guide for Aluminium Grade 6063–T5 (Aluminium 6063–T5),” [aluminiumshop.net](https://www.aluminiumshop.net), n.d. [Online]. Available: <https://www.aluminiumshop.net/article-detail.html?id=1> (accessed Jun. 21, 2026) (in Thai).
- [13] ASM International Handbook Committee, *ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering*, Materials Park, OH, USA: ASM International, 1994.
- [14] E. R. Eiriksson, J. Wilm, D. B. Pedersen, and H. Aanæs, “Precision and Accuracy Parameters in Structured Light 3–D Scanning,” *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL–5/W8, pp. 7–15, 2016.
- [15] T. T. No, S. C. Feng, and J. D. Summers, “Structured Light Scanning Artifact–Based Performance Study,” *Manufacturing Letters*, vol. 35, pp. 873–882, 2023.
- [16] M. E. Polo, A. Cuartero, and A. M. Felicísimo, “Study of Uncertainty and Repeatability in Structured–Light 3D Scanners,” *Sensors*, vol. 19, no. 21, pp. 1–18, 2019.
- [17] R. Leach, S. Giusca, S. Haitjema, and P. Evans, “Mapping and Correcting the Distortion of Structured Light Scanners,” *Precision Engineering*, vol. 72, pp. 543–555, 2021.

การวิเคราะห์อิทธิพลของการวางตำแหน่งชิ้นงานเรขาคณิตที่มีต่อการเกิดโครงสร้างรองรับ และประสิทธิภาพการพิมพ์ในกระบวนการขึ้นรูปสามมิติแบบ FDM

Analysis of Part Orientation Influence on Geometric Shapes regarding Support Structure Formation and Printing Efficiency in Fused Deposition Modeling (FDM)

ศุภสิทธิ์ มะโนเครื่อง¹ ขวัญ สุริโยธิน¹ ธีรวัฒน์ แสงภาศ¹ ศุภชัย อัครนรากุล¹ และ อติเรก ชัยนวกุล^{1*}

¹หลักสูตรวิศวกรรมแม่พิมพ์และเครื่องมือ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมืองจังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Supasit Manokruang¹ Chawagrit Suriyothin¹ Teerawat Sangkas¹ Supachai Aukaranarakul¹

and Adirake Chainawakul^{1*}

¹Tools and Die Engineering Program, Department of Industrial Engineering,

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

128 Huay Kaew Rd, Tambon Chang Phueak, Mueang Chiang Mai District, Chiang Mai 50300

*Corresponding author Email: adirake@rmutl.ac.th

(Received: June 6, 2026; Revise: June 29, 2026; Accepted: June 29, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของการวางตำแหน่งชิ้นงานเรขาคณิตที่มีต่อการเกิดโครงสร้างรองรับและประสิทธิภาพในการพิมพ์สามมิติด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเหลว โดยทำการทดสอบกับรูปทรงเรขาคณิต 6 รูปแบบ ได้แก่ ปริซึมสามเหลี่ยม พีระมิด ลูกบาศก์ ปริซึมห้าเหลี่ยม ทรงกรวย และทรงกลม กำหนดการวางตำแหน่งระดับมุมเอียงตั้งแต่ 0° ถึง 90° และเพิ่มขึ้นทุก ๆ 10° ผ่านโปรแกรม UltiMaker Cura 5.10.0 ผลการศึกษาพบว่าลักษณะทางเรขาคณิตและการวางตำแหน่งส่งผลโดยตรงต่อการใช้ทรัพยากรและเวลาในการพิมพ์ โดยรูปทรงลูกบาศก์และพีระมิดมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อวางในแนวราบ (0°) เนื่องจากไม่เกิดโครงสร้างฐานรองรับ ในขณะที่รูปทรงกลมมีวัสดุจากฐานรองรับมากที่สุดสำหรับรูปทรงปริซึมสามเหลี่ยม ปริซึมห้าเหลี่ยม และทรงกรวย จะเกิดจุดวิกฤตที่ต้องสร้างโครงสร้างรองรับโดยอัตโนมัติเมื่อมุมเอียงมากกว่า 45° จากแนวแกนตั้งฉาก ส่งผลให้ปริมาณการใช้วัสดุรองรับและระยะเวลาการพิมพ์เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการวางแนวราบ ข้อมูลเชิงปริมาณเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจออกแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อลดต้นทุนการผลิตและการผลิตที่ยั่งยืนในอนาคต

คำสำคัญ: การวางตำแหน่ง โครงสร้างรองรับ การพิมพ์ขึ้นรูปสามมิติ การผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ

Abstract

This research aims to examine the influence of part orientation on support structure formation and printing efficiency in Fused Deposition Modeling (FDM). Experimental tests were conducted on six geometric shapes: a triangular prism, a pyramid, a cube, a pentagonal prism, a cone, and a sphere. The positioning angles ranged from 0° to 90° in 10° increments and were processed with UltiMaker Cura 5.10.0. The results

indicate that geometric characteristics and part orientation directly affect resource consumption and printing time. Cubes and pyramids demonstrated the highest efficiency when oriented horizontally (0°), as they required no support structures, whereas spheres exhibited high sensitivity and generated the most support material. For the triangular prism, pentagonal prism, and cone, a critical threshold for triggering automatic support-structure formation was observed at angles exceeding 45° from the vertical axis. This consequence led to increased consumption of support material and longer printing times than in the horizontal orientation. These quantitative findings can serve as practical guidelines for Design for Additive Manufacturing (DfAM) to minimize production costs and promote sustainable manufacturing in the future.

Keywords: Part Orientation, Support Structures, Fused Deposition Modeling (FDM), Additive Manufacturing

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตทั่วโลกกำลังก้าวเข้าสู่ยุคการผลิตที่เน้นความยืดหยุ่นและทรัพยากรอย่างจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการใช้วัสดุเพื่อการผลิตอย่างยั่งยืน โดยหนึ่งในเทคโนโลยีที่สำคัญคือการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing: AM) [1] หรือโดยทั่วไปคือการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) [2] เทคโนโลยีนี้ช่วยให้การเปลี่ยนจากแบบจำลองชิ้นงาน เปลี่ยนเป็นชิ้นงานจริงทำได้รวดเร็ว ลดขั้นตอนการขึ้นรูปที่ซับซ้อน และลดการสูญเสียวัตถุดิบเมื่อเทียบกับการผลิตแบบดั้งเดิมที่ใช้การตัดเฉือนเนื้อวัสดุออก (Subtractive Manufacturing: SM) [3] อย่างไรก็ตาม กระบวนการพิมพ์ในรูปแบบ Fused Deposition Modeling (FDM) [4] ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่แพร่หลายที่สุด ยังคงมีข้อจำกัดทางเทคนิคที่สำคัญ โดยเฉพาะสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผลิตออกมา ซึ่งมักจะไม่สม่ำเสมอในทุกทิศทางเนื่องจากลักษณะการวางซ้อนกันของชั้นวัสดุ (Layer-by-Layer) [5]

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานพิมพ์ 3 มิติ คือ การวางทิศทางชิ้นงาน (Part Orientation) [6] เนื่องจากการพิมพ์แบบ FDM มีลักษณะการทำงานที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีความเป็นอนิโซโทรปี (Anisotropy) สูง หรือกล่าวคือชิ้นงานจะมีความแข็งแรงในแนวแกนที่ขนานกับเส้นวัสดุมากกว่าแนวแกนที่ตั้งฉากกับรอยประสานระหว่างชั้น [7] นอกจากนี้ ทิศทางการวางชิ้นงานบนฐานพิมพ์ยังส่งผลกระทบต่อความหยาบผิว (Surface Roughness) อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ขั้นบันได (Staircase Effect) ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและต้องการความละเอียดทางขนาดสูง ยิ่งไปกว่านั้น การวางตำแหน่งที่ผิดพลาดนำมาซึ่งการสร้างโครงสร้างรองรับ (Support Structure) ที่เกินความจำเป็น ทำให้เกิดการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาการพิมพ์ที่ยาวนานขึ้น และปริมาณขยะพลาสติกจากการแกะส่วนรองรับทิ้ง ซึ่งขัดต่อหลักการผลิตสีเขียวและความยั่งยืน [8–10]

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของการวางตำแหน่งชิ้นงานในแนวแกนที่แตกต่างกัน โดยการวิเคราะห์และเปรียบเทียบเชิงลึกร่วมกันระหว่างรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่มีความซับซ้อนต่างกันถึง 6 รูปแบบ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงอย่างละเอียดตั้งแต่ 0° ถึง 90° เพื่อสร้างแนวทางการออกแบบเพื่อการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ (Design for Additive Manufacturing: DfAM) [11] ช่องทางวิชาการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อลดของเสียและต้นทุนการผลิตได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตแบบเติมเนื้อ (Additive Manufacturing: AM)

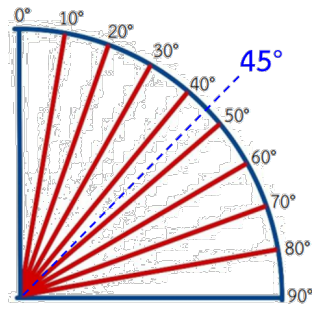
กระบวนการผลิตแบบเติมเนื้อ (Additive Manufacturing: AM) หรือที่นิยมเรียกกันทั่วไปว่าเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D Printing) เป็นนวัตกรรมการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีหลักการพื้นฐานแตกต่างจากการผลิตแบบเดิม คือ กระบวนการตัดเฉือนเนื้อวัสดุ (Subtractive Manufacturing) อย่างสิ้นเชิง โดยมีรายละเอียดทางทฤษฎีที่สำคัญดังนี้ หลักการขึ้นรูปชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer): กระบวนการ AM อาศัยการสร้างวัตถุสามมิติจากการวางวัสดุเรียงต่อกันเป็นชั้นต่อเนื่องในแนวแกน Z ซึ่งแต่ละชั้นจะมีความหนาที่แม่นยำตามการคำนวณของซอฟต์แวร์ การเชื่อมโยงข้อมูลดิจิทัล (Digital Integration) การผลิตจะเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (Computer-Aided Design: CAD) [12] จากนั้นข้อมูลจะถูกตัดแบ่งเป็นชั้นข้อมูลสองมิติ (Sequential Layers) เพื่อใช้เป็นชุดคำสั่งให้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมหัวฉีดหรือแหล่งพลังงานในการขึ้นรูปวัสดุตามรูปร่างที่กำหนดไว้ ความหลากหลายของวัสดุและรูปร่าง: เทคโนโลยีนี้รองรับการใช้วัสดุที่หลากหลายทั้งพลาสติก (Thermoplastic) และโลหะ (Metal) โดยมีจุดเด่นสำคัญคือความสามารถในการสร้างชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูง (Geometric Complexity) ซึ่งกระบวนการตัดปาดหรือการหล่อแบบเดิมไม่สามารถทำได้ หรือทำได้ยาก [13–15] กระบวนการ AM ช่วยลดการสูญเสียเนื้อวัสดุในระหว่างการผลิต (Material Waste Reduction) และผลิตตามความต้องการ (On-demand Manufacturing) ในด้านการผลิตอย่างยั่งยืน [16–17]

2.2 การขึ้นรูปสามมิติด้วยกระบวนการขึ้นรูปด้วยการฉีดวัสดุหลอมละลาย (Fused Deposition Modeling: FDM)

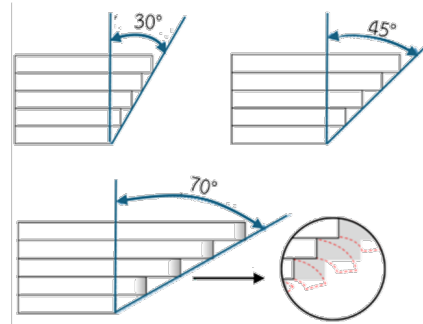
กระบวนการขึ้นรูปสามมิติด้วยการฉีดพลาสติกเหลวหรือ Fused Deposition Modeling (FDM) จัดเป็นเทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing) ที่ได้รับความนิยมสูงสุดในอุตสาหกรรมปัจจุบัน เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำและใช้งานได้หลากหลาย โดยหลักการทำงานพื้นฐานเริ่มจากการส่งผ่านวัสดุเทอร์โมพลาสติกในลักษณะเส้น (Filament) [18] เข้าสู่ชุดหัวฉีดที่มีการควบคุมอุณหภูมิให้สูงกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของไหล จากนั้นหัวฉีดจะเคลื่อนที่ตามแนวแกน X และ Y เพื่อวางลำวัสดุลงบนฐานพิมพ์ตามรูปร่างที่กำหนดไว้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์กราฟิก เมื่อวัสดุที่ถูกฉีดออกมาสัมผัสกับอากาศหรือฐานพิมพ์จะเกิดการเย็นตัวและแข็งตัวยึดติดกับชั้นก่อนหน้า เกิดเป็นการประสานตัวระหว่างชั้น (Interlayer Bonding) จนกลายเป็นชิ้นงานสามมิติที่สมบูรณ์ในที่สุด ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางกลและความแม่นยำทางมิติของชิ้นงานประกอบด้วย พารามิเตอร์การพิมพ์ที่หลากหลาย เช่น อุณหภูมิของหัวฉีด (Printing Temperature) ความเร็วในการพิมพ์ (Printing Speed) และความหนาของชั้นการพิมพ์ (Layer Height) รวมถึงลักษณะการเรียงตัวของเส้นพลาสติกภายใน (Infill Pattern) ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงเชิงโครงสร้างและความยืดหยุ่นของชิ้นงาน [19–20]

2.3 มุมลาดเอียงของงานขึ้นรูปสามมิติ (Overhang)

ทฤษฎีมุมส่วนยื่นหรือมุม Overhang ในกระบวนการพิมพ์สามมิติแบบฉีดพลาสติก (FDM) ถือเป็นปัจจัยวิกฤตที่มีผลต่อความสำเร็จในการขึ้นรูปชิ้นงานโดยอาศัยหลักการซ้อนทับกันของชั้นวัสดุ (Layer-by-Layer Deposition) ซึ่งโดยทั่วไปจะยึดถือ กฎ 45 องศา เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้โครงสร้างรองรับ (Support Structures) [21] ที่สิ้นเปลืองและยากต่อการกำจัดทิ้งหลังการผลิต ดังรูปที่ 1 ในเชิงวิศวกรรมการผลิตนั้น การที่หัวพิมพ์ฉีดเส้นพลาสติกออกมาในตำแหน่งที่เอียงออกจากจุดกึ่งกลางของชั้นฐานด้านล่าง จะทำให้เกิดแรงโมเมนต์จากน้ำหนักของวัสดุในสภาวะกึ่งหลอมละลายที่พยายามดึงรั้งให้เส้นพลาสติกย้อยตัวลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก หากมุมลาดเอียงมีค่ามากเกินไปจนเกินกว่าขอบเขตที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นจะรับไหว ซึ่งความสัมพันธ์นี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรสำคัญหลายประการ เช่น ความสูงของชั้นพิมพ์ (Layer Height) ความกว้างของการฉีดเส้นวัสดุ (Extrusion Width) และประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนที่ช่วยให้วัสดุเซตตัวได้รวดเร็วขึ้น [22] แสดงดังรูปที่ 2



(ก)

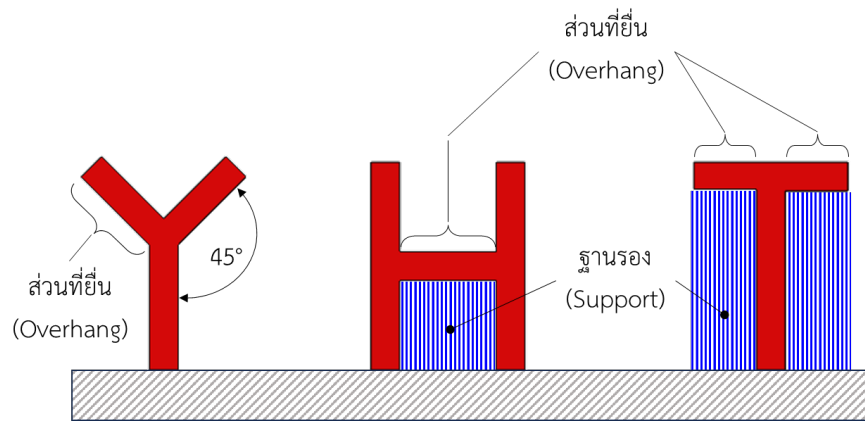


(ข)

รูปที่ 1 มุมองศาการสร้างฐานรอง (Support)

(ก) มุมองศาจาก 0°–90° จากแนวตั้งฉาก

(ข) มุมองศาที่สร้างฐานรองรับ (Support)



รูปที่ 2 รูปแบบการวางตำแหน่ง

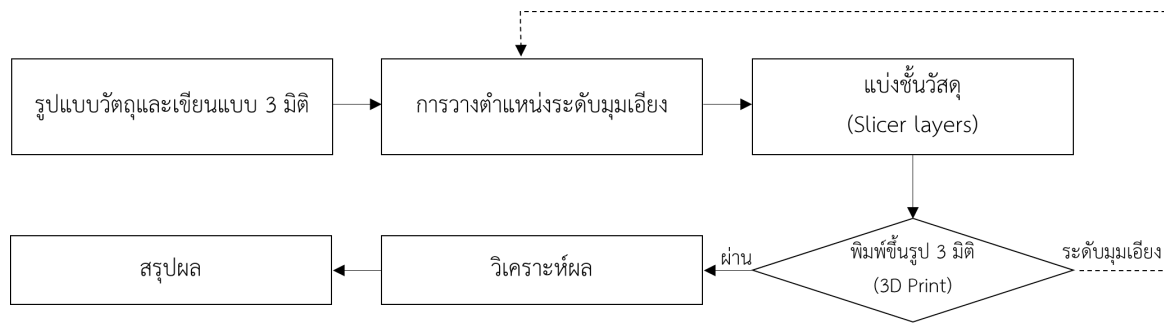
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หลักการออกแบบเพื่อการผลิตแบบเติมเนื้อ (Design for Additive Manufacturing: DfAM) [23] เป็นแนวคิดพื้นฐานที่ใช้ควบคุมความซับซ้อนของรูปทรงให้สอดคล้องกับขีดจำกัดของเครื่องพิมพ์ขึ้นงาน 3 มิติ ซึ่งต้องออกแบบชิ้นงานให้อยู่ในขอบเขตความสามารถของเครื่องพิมพ์ พร้อมทั้งอาศัยการปรับตั้งค่าตัวแปรประกอบการพิมพ์ (Slicing Parameters) [24] ช่วยให้ผู้สามารถผลิตงานที่ซับซ้อนได้เสถียรขึ้น โดยคำนึงถึงหลักการซ้อนทับกันของชั้นวัสดุ เพื่อกำหนดทิศทางการวางตำแหน่งและลักษณะโครงสร้างภายในชิ้นงาน โดยตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับทฤษฎีเวลาการพิมพ์และจำนวนชั้นการพิมพ์ (Build Time and Layer Count Theory) [25] ซึ่งระบุว่าความสูงของวัตถุในแนวตั้งจะแปรผันตรงกับระยะเวลาที่ใช้และจำนวนรอบการเคลื่อนที่ของหัวฉีดวัสดุ รวมถึงความแข็งแรงของชิ้นงานที่สัมพันธ์กับการจัดวางที่ควรวางระนาบชั้นการพิมพ์ให้ตั้งฉากกับแนวรับแรงของชิ้นงาน นอกจากนี้ การจัดวางที่ไม่เหมาะสมยังนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนทางปริมาตร (Volumetric Error) [26] ซึ่งส่งผลให้ความแม่นยำด้านมิติและขนาดของผลิตภัณฑ์จริงคลาดเคลื่อนไปจากแบบจำลอง 3 มิติที่เขียนขึ้นจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ส่วนยื่น (Overhangs) ที่ต้องใช้โครงสร้างรองรับ ท้ายที่สุด ทฤษฎีการใช้วัสดุและการเกิดเศษวัสดุ (Material Consumption & Waste) [27] จะเป็นตัวชี้วัด

ประสิทธิภาพของการผลิต โดยมุ่งเน้นการลดปริมาณพลาสติกส่วนเกินจากการสร้างส่วนรองรับให้เหมาะสมและเพียงพอสำหรับการพิมพ์ชิ้นงานนั้น ๆ ได้สมบูรณ์ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการผลิตที่ยั่งยืนภายใต้การใช้วัสดุอย่างคุ้มค่าที่สุด

3. การดำเนินงานวิจัย

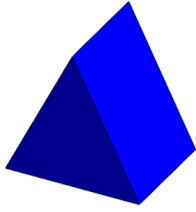
การศึกษานี้ได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อวิเคราะห์ผลของการวางตำแหน่งชิ้นงานต่อการเกิดโครงสร้างรองรับ (Support Structure) โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 3



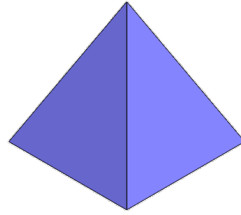
รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานของการวางตำแหน่งชิ้นงาน

3.1 กำหนดรูปร่างและเขียนแบบสามมิติ

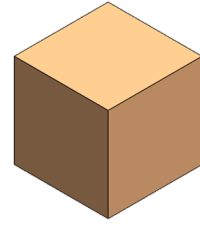
ในการดำเนินงานวิจัยเพื่อให้ครอบคลุมลักษณะทางเรขาคณิตที่หลากหลายซึ่งมักพบในงานวิศวกรรมและการออกแบบผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัยได้กำหนดรูปแบบชิ้นงานทดสอบโดยมุ่งเน้นที่ความแตกต่างของระนาบสัมผัส มุมลาดเอียง และความซับซ้อนของพื้นผิว กระบวนการเริ่มต้นจากการออกแบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (Computer-Aided Design: CAD) เพื่อสร้างวัตถุสามมิติที่มีปริมาตรและขนาดที่แน่นอนสำหรับใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบผลการทดสอบ โดยรูปทรงเรขาคณิตทั้ง 6 รูปแบบที่ถูกคัดเลือกมาประกอบด้วยรูปทรงที่มีฐานเรียบ รูปทรงหลายเหลี่ยม และรูปทรงที่มีผิวโค้งมน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของการวางตำแหน่งที่มีต่อการเกิดโครงสร้างรองรับได้อย่างชัดเจนในทุกมิติ โดยมีรายละเอียดขนาดและปริมาตรของแต่ละรูปทรง ดังรูปที่ 4



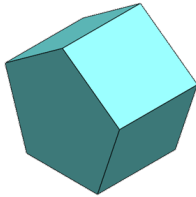
ปริซึมสามเหลี่ยม



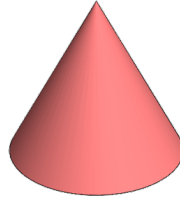
พีระมิด



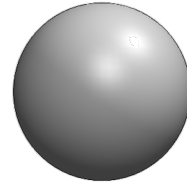
ลูกบาศก์



ปริซึมห้าเหลี่ยม



ทรงกรวย



ทรงกลม

รูปที่ 4 รูปแบบชิ้นงานทดสอบการวางตำแหน่ง

โดยรูปทรงเรขาคณิตทั้ง 6 รูปแบบ ที่ทำการวิจัยมีขนาด และน้ำหนักดังต่อไปนี้

3.1.1 ปริซึมสามเหลี่ยม (Triangular Prism) ขนาด 50 x 50 x 50 มม. (กว้างxยาวxสูง) และปริมาตร 54,126.59 ลบ.มม.

- คำนวณหามวล (ก.) = ปริมาตร (ลบ.มม.) x ความหนาแน่นของ PLA (ก./ลบ.มม.)
= 54,126.59 x 0.00124
= 67.12 กรัม

3.1.2 พีระมิด (Pyramid) ขนาด 50 x 50 x 50 มม. (กว้างxยาวxสูง) และปริมาตร 40,887.72 ลบ.มม.

- คำนวณหามวล (ก.) = ปริมาตร (ลบ.มม.) x ความหนาแน่นของ PLA (ก./ลบ.มม.)
= 40,887.72 x 0.00124
= 50.70 กรัม

3.1.3 ลูกบาศก์ (Cube) ขนาด 50 x 50 x 50 มม. (กว้างxยาวxสูง) และปริมาตร 125,000.00 ลบ.มม.

- คำนวณหามวล (ก.) = ปริมาตร (ลบ.มม.) x ความหนาแน่นของ PLA (ก./ลบ.มม.)
= 125,000.00 x 0.00124
= 155.00 กรัม

3.1.4 ปริซึมห้าเหลี่ยม (Pentagonal Prism) จะมีขนาด 50 x 50 x 50 มม. (กว้างxยาวxสูง) และปริมาตร 113,522.27 ลบ.มม.

- คำนวณหามวล (ก.) = ปริมาตร (ลบ.มม.) x ความหนาแน่นของ PLA (ก./ลบ.มม.)
= 113,522.27 x 0.00124
= 140.77 กรัม

3.1.5 ทรงกรวย (Cone) จะมีขนาด 50 x 50 x 50 มม. (กว้างxยาวxสูง) และปริมาตร 32,113.14 ลบ.มม.

- คำนวณหามวล (ก.) = ปริมาตร (ลบ.มม.) x ความหนาแน่นของ PLA (ก./ลบ.มม.)
= 32,113.14 x 0.00124

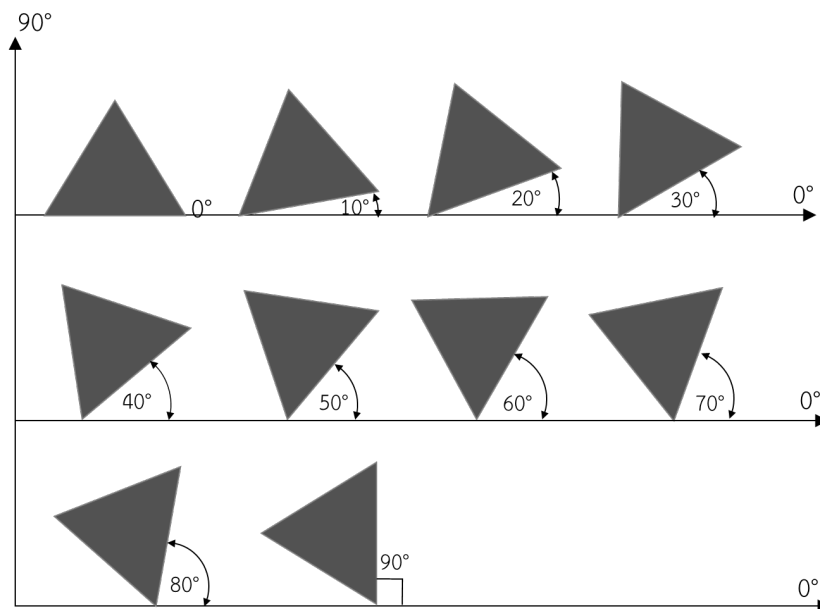
$$= 39.82 \text{ กรัม}$$

3.1.6 ทรงกลม (Sphere) จะมีขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. (กว้างxยาวx สูง) และปริมาตร 65,449.85 ลบ.มม.

$$\begin{aligned} \bullet \text{ คำนวณหามวล (ก.)} &= \text{ปริมาตร (ลบ.มม.)} \times \text{ความหนาแน่นของ PLA (ก./ลบ.มม.)} \\ &= 65,449.85 \times 0.00124 \\ &= 81.16 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

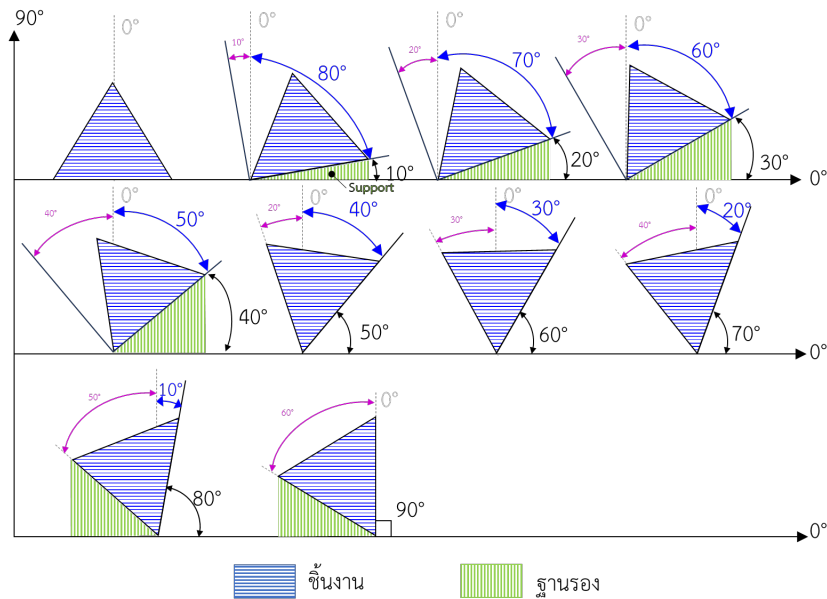
3.2 การวางตำแหน่งระดับมุมเอียง

การวางตำแหน่งมีส่วนสำคัญอย่างมาก การทดลองนี้มุ่งเน้นการวางตำแหน่งชิ้นงาน โดยเริ่มตำแหน่ง 0° – 90° ทำการเพิ่มทุก ๆ 10° หลังจากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานโดยกระบวนการแบ่งชั้น (Slicer) [27] นำชิ้นงานที่ได้จากการสร้างแบบ 3 มิติ เข้าสู่กระบวนการ Slicer ผ่านโปรแกรม UltiMaker Cura 5.10.0 การ Slicer เป็นการสร้าง Layer ให้ชิ้นงานขึ้นเป็นชั้น ๆ เพื่อเตรียมไฟล์สำหรับการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ โดยแปลงไฟล์โมเดล 3 มิติ (เช่น STL, OBJ) ให้กลายเป็นคำสั่งสำหรับเครื่องพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ ซึ่งต้องคำนึงถึงการเลือกวางแนวของชิ้นงานตามความเหมาะสม แสดงตัวอย่างรูปทรงพีระมิด ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวอย่างลักษณะการวางตำแหน่งของชิ้นงาน 0° – 90°

การเกิดฐานรองรับ (Support) การปรับมุมเอียง ตำแหน่งของชิ้นงานแต่ละรูปทรง จะเกิดขึ้นเมื่อมุมเอียงมากกว่า 45° จากแนวแกน 90° แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเกิดฐานรอง (Support) ของมุมเอียง $> 45^\circ$ จากแนวแกน 90°

3.3 วัสดุเส้นพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid: PLA)

กระบวนการผลิตเส้นโดยใช้วิธีการอัดรีด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นของหัวฉีดอัดรีด 1.75 มม. โดยคุณสมบัติของวัสดุนี้เป็นพลาสติกชีวภาพชนิดหนึ่งนิยมนำมาใช้งานพิมพ์ 3 มิติ ยังมีคุณสมบัติที่ช่วยให้พื้นผิวการพิมพ์ที่เรียบเนียน สวยงาม และความแข็งแรง แต่มีข้อจำกัดบางอย่าง เช่น ความยืดหยุ่นต่ำ เปราะได้ง่าย เมื่อได้รับแรงดัด หรือแรงกระแทกสูง และไม่เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความยืดหยุ่น PLA จึงเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการใช้งานในงานออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความทนทานต่อความร้อนสูง และเป็นวัสดุที่ตอบสนองต่อความต้องการในการรักษาสีแว่นล้น ความหนาแน่นของวัสดุ PLA ≈ 1.24 ก./ลบ.ซม. โดยพารามิเตอร์ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ของการขึ้นรูปสามมิติรูปทรงเลขาคณิตของวัสดุ PLA

ลำดับที่	รายการ	ค่า	หน่วย
1	อุณหภูมิหลอมละลาย (Melt temperature)	220	องศาเซลเซียส
2	อุณหภูมิฐาน (Bed temperature)	60	องศาเซลเซียส
3	ความเร็วในการพิมพ์ (Speed)	100	มม./วินาที

3.4 เครื่องพิมพ์สามมิติ

เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้ในกระบวนการทดลอง รุ่น Anet ET4 เครื่องมีขนาด 440 x 340 x 480 มม. มีขนาดพื้นที่ในการพิมพ์ได้สูงสุด 220 x 220 x 250 มม. ความเร็วสูงสุดในการพิมพ์ 150 มม./วินาที ขนาดหัวฉีด (Nozzle) 0.4 มม. โดยรูปแบบการพิมพ์ภายใน (Infill pattern) เป็นรูปแบบตาราง (Grid) แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น Anet ET4

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการวิเคราะห์ข้อผิดพลาดของการวางตำแหน่งชิ้นงานตั้งแต่ 0° ถึง 90° พบว่าลักษณะทางเรขาคณิตของแต่ละรูปทรงส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างรองรับและประสิทธิภาพการพิมพ์ที่แตกต่างกัน ดังนี้

4.1 ปริซึมสามเหลี่ยม (Triangular Prism)

เป็นรูปทรงที่มีมุมเอียงในตัว การวางที่มุม 0° ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเนื่องจากฐานกว้างและไม่มีส่วนยื่นที่เกินกฎ 45° แต่เมื่อเริ่มบิดเอียงชิ้นงานในองศาที่สูงขึ้น พื้นผิวด้านหนึ่งจะกลายเป็นมุม Overhang ทันที ทำให้ต้องมีการสร้าง Support เพื่อพยุงน้ำหนักพลาสติกไม่ให้ยุ่ยตัว แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลการขึ้นรูปการวางตำแหน่งของรูปทรงปริซึมสามเหลี่ยม

4.2 พีระมิด (Pyramid)

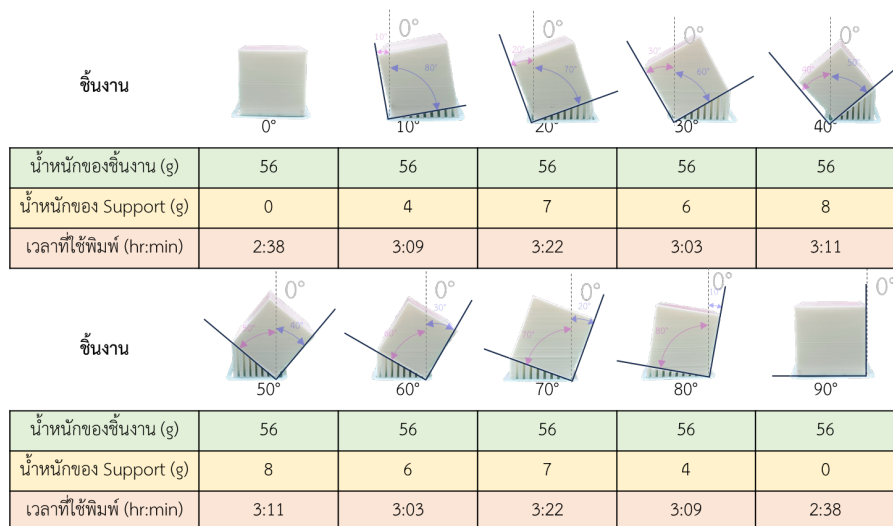
มีลักษณะการกระจายน้ำหนักเข้าสู่ศูนย์กลาง เมื่อวางในแนวปกติจะมีความมั่นคงสูงและไม่จำเป็นต้องใช้ฐานรองรับ แต่หากวางเอียงในทิศทางที่ไม่เหมาะสม พื้นที่ส่วนยอดและด้านข้างจะเกิดแรงโมเมนต์จากน้ำหนักวัสดุในสภาวะกึ่งหลอมละลาย ส่งผลให้ต้องใช้ Support เพื่อประคองรูปทรงให้คงรูปตามแบบ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลการขึ้นรูปการวางตำแหน่งของรูปทรงพีระมิดสามเหลี่ยม

4.3 ลูกบาศก์ (Cube)

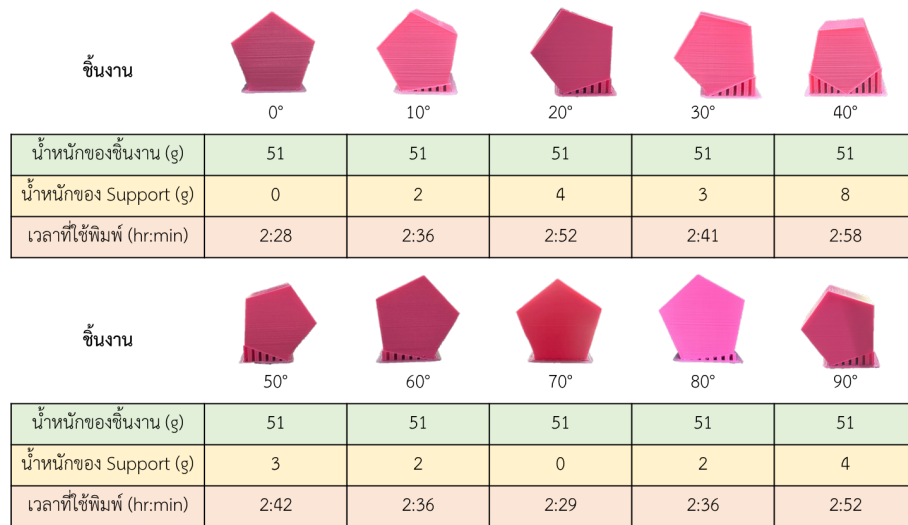
จากผลการทดลองพบว่ารูปทรงลูกบาศก์เมื่อทำมุมเอียง 45° จะเกิดปริมาณโครงสร้างรองรับสูงสุดเนื่องจากพื้นที่ผิวระนาบทั้งหมดเปลี่ยนสภาพเป็นพื้นที่ยื่น (Overhang พื้นที่ลอย) ซึ่งหัวพิมพ์ไม่สามารถยึดเนื้อวัสดุบนอากาศได้ จึงต้องอาศัยฐานรองรับขนาดใหญ่เพื่อรับแรงโมเมนต์จากน้ำหนักวัสดุที่หลอมละลายที่แปรผันตามกฎพื้นที่ยื่น (Overhang) 45 องศา ในขณะที่ทรงกลมมีปริมาณฐานรองรับ (Support) คงที่ เนื่องจากลักษณะทางเรขาคณิตที่มีจุดสัมผัสฐานพิมพ์เพียงจุดเดียว (Tangential Point) ทำให้ทุก ๆ ระนาบมุมเอียง 0–360 องศา มีพฤติกรรมการเกิด Overhang ที่ส่วนโค้งด้านล่างเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลการขึ้นรูปการวางตำแหน่งของรูปทรงลูกบาศก์

4.4 ปริซึมห้าเหลี่ยม (Pentagonal Prism)

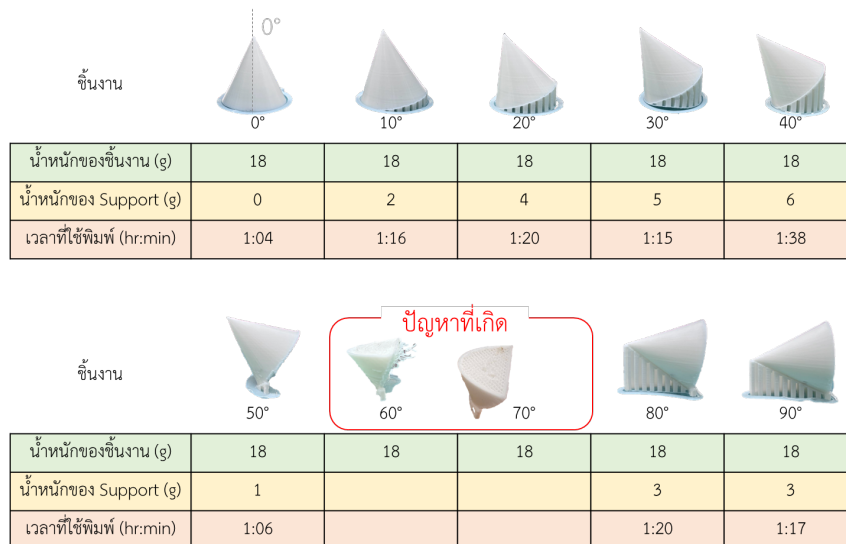
มีความซับซ้อนของมุมมากกว่ารูปทรงสามเหลี่ยม การวางตำแหน่งส่งผลให้เกิดจุดวิกฤต (Critical Point) ในหลายระนาบ โดยเฉพาะเมื่อปรับมุมเอียงในช่วง 70°–90° ซึ่งจะมีการสร้าง Support ในปริมาณที่คงที่ เพื่อรองรับเหลี่ยมมุมที่ยื่นออกมาจนแนวแกนตั้งฉาก แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลการขึ้นรูปการวางตำแหน่งของรูปทรงปริซึมห้าเหลี่ยม

4.5 ทรงกรวย (Cone)

เป็นรูปทรงที่มีหน้าตัดเล็กลงตามความสูง หากวางโดยเอาฐานลงจะพิมพ์ได้โดยไม่ต้องใช้ Support แต่การทดสอบวางในตำแหน่งอื่น จะทำให้ผิวโค้งด้านข้างมีส่วนที่ลาดชันเกิน 45° ส่งผลให้ผิวชิ้นงานเกิดปรากฏการณ์ขั้นบันได (Staircase Effect) ได้ง่ายหากไม่มี Support รองรับที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ผลการขึ้นรูปการวางตำแหน่งของรูปทรงกรวย

4.6 ทรงกลม (Sphere)

เป็นรูปทรงที่มีความอ่อนไหวต่อการวางตำแหน่งสูงสุด เนื่องจากมีจุดสัมผัสกับฐานพิมพ์เพียงจุดเดียวในทางทฤษฎีการวางตำแหน่งใด ๆ จึงเสี่ยงไม่ได้ที่จะต้องใช้ Support ปริมาตรรอบส่วนโค้งด้านล่าง เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุยุบตัวตามแรงโน้มถ่วงของโลก แสดงดังรูปที่ 13

ชิ้นงาน



0-360°

น้ำหนักของชิ้นงาน (g)	31
น้ำหนักของ Support (g)	2
เวลาที่ใช้พิมพ์ (hr:min)	1:28

รูปที่ 13 ผลการขึ้นรูปการวางตำแหน่งของรูปทรงกลม

5. สรุป

จากการวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของการวางตำแหน่งชิ้นงานต่อประสิทธิภาพการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าทิศทางการวางบนฐานพิมพ์เป็นปัจจัยวิกฤตที่กำหนดทั้งคุณภาพและต้นทุนการผลิต โดยผลการทดสอบชี้ชัดว่า ลูกบาศก์ และ พีระมิด มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อวางในแนวราบเนื่องจากไม่เกิดโครงสร้างรองรับเลย ในขณะที่ ทรงกลม เป็นรูปทรงที่จัดการยากที่สุดและเกิดขยะวัสดุสูงที่สุดจากการใช้ Support ปริมาณมากรอบฐาน สำหรับ ปริซึมสามเหลี่ยม และ ปริซึมห้าเหลี่ยม จะมีความอ่อนไหวต่อมุมเอียงที่มากกว่า 45 องศา ซึ่งจะเริ่มสร้างภาระด้านเวลาและวัสดุทันที ส่วน ทรงกรวย มักพบปัญหาเรื่องคุณภาพผิวบริเวณส่วนยอดหากวางตำแหน่งไม่เหมาะสม ดังนั้น หลักการสำคัญในการพิจารณาพิมพ์ชิ้นงานคือการใช้ซอฟต์แวร์ Slicer วิเคราะห์หาตำแหน่งที่เกิดมุม Overhang น้อยที่สุดเพื่อลดการใช้ Support พิจารณาเลือกด้านที่มีพื้นที่สัมผัสฐานพิมพ์กว้างที่สุดเพื่อความมั่นคง การประเมินความสมดุลระหว่างเวลาพิมพ์กับคุณภาพผิวชิ้นงานมีปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวในเชิงวิศวกรรม คือ มุมวิกฤต (Critical Angle): สำหรับวัสดุทั้งสองชนิด หากมุมลาดเอียงเกิน 45 องศา จะเริ่มส่งผลต่อคุณภาพผิวได้ ชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากวัสดุจะเริ่มย่อยตัวตามแรงโน้มถ่วง อุณหภูมิและการระบายความร้อนของ PLA ต้องการหล่อเย็นทันทีเพื่อให้วัสดุคงรูปหลังจากออกจากหัวฉีด ในขณะที่ ABS ต้องการสภาพแวดล้อมที่ปิดและอุณหภูมิคงที่เพื่อป้องกันการแยกชั้น (Delamination) และโครงสร้างรองรับ (Support) จะเกิดรอยจุดสัมผัสไว้บนผิวงานเสมอ ดังนั้นการเลือกวางตำแหน่งชิ้นงานเพื่อลด Support จึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการรักษาคุณภาพผิว ซึ่งในอนาคต ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฐานข้อมูลในการตัดสินใจออกแบบผลิตภัณฑ์ (Design for Additive Manufacturing: DfAM) โดยการออกแบบควรคำนวนทิศทางการวางชิ้นงานตั้งแต่ขั้นตอนเริ่มต้น เพื่อลดความซับซ้อนของรูปทรงในส่วนที่ต้องใช้ Support หรือออกแบบส่วนยื่นให้มีมุมลาดเอียงตามกฎ 45° เพื่อลดต้นทุนการผลิต ลดระยะเวลาการทำงาน

สรุปงานวิจัยนี้พบว่า ลักษณะความโค้งมนและจำนวนเหลี่ยมมุมสัมผัสของเรขาคณิตเป็นตัวแปรวิกฤตต่อการเกิดของเสียพลาสติก โดยรูปทรงที่มีระนาบผิวสัมผัสฐานกว้างจะทรงประสิทธิภาพสูงสุดในแนวราบ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้ คือเป็นการประเมินและจำลองผลผ่านซอฟต์แวร์ UltiMaker Cura 5.10.0 บนเงื่อนไขของวัสดุ PLA เท่านั้น ในการทำงานจริงพฤติกรรมของชิ้นงานและการย่อยตัวของวัสดุอาจเปลี่ยนแปลงไปตามประสิทธิภาพของพัลลภระบายความร้อนและประเภทวัสดุอื่น เช่น ABS หรือ PETG ซึ่งควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการทดลองขั้นต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุน หลักสูตรวิศวกรรมแม่พิมพ์และเครื่องมือ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ในการอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ สำหรับการทดลองในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Manokruang, F. Vignat, M. Museau, and M. Linousin, “Model of Weld Beads Geometry Produced on Surface Temperatures by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM),” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1063, no. 1, p. 012008, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1063/1/012008.
- [2] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, “An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications,” *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1286–1296, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
- [3] K. Sathish et al., “A Comparative Study on Subtractive Manufacturing and Additive Manufacturing,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, pp. 1–8, Apr. 2022, doi: 10.1155/2022/6892641.
- [4] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidillah, and Z. Arifin, “A Review on the Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing: Filament Processing, Materials, and Printing Parameters,” *Open Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 639–649, Jan. 2021, doi: 10.1515/eng-2021-0063.
- [5] H. Mu, J. Polden, Y. Li, F. He, C. Xia, and Z. Pan, “Layer-by-Layer Model-Based Adaptive Control for Wire Arc Additive Manufacturing of Thin-Wall Structures,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 33, no. 4, pp. 1165–1180, Mar. 2022, doi: 10.1007/s10845-022-01920-5.
- [6] D. Singh, M. P. Singh, and Y. Shrivastava, “Influence of Part Orientation on the Quality and Performance of 3D Printed Components: A Comprehensive Review,” *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 10, no. 12, pp. 10649–10684, Jul. 2025, doi: 10.1007/s40964-025-01256-5.
- [7] G. Ma, Z. Li, L. Wang, F. Wang, and J. Sanjayan, “Mechanical Anisotropy of Aligned Fiber Reinforced Composite for Extrusion-Based 3D Printing,” *Construction and Building Materials*, vol. 202, pp. 770–783, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008.
- [8] J. Hartcher-O’Brien, J. Evers, and E. Tempelman, “Surface Roughness of 3D Printed Materials: Comparing Physical Measurements and Human Perception,” *Materials Today Communications*, vol. 19, pp. 300–305, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.mtcomm.2019.01.008.
- [9] J. Yuan, C. Chen, D. Yao, and G. Chen, “3D Printing of Oil Paintings Based on Material Jetting and Its Reduction of Staircase Effect,” *Polymers*, vol. 12, no. 11, p. 2536, Oct. 2020, doi: 10.3390/polym12112536.
- [10] Z. Guoqing, L. Junxin, Z. Xiaoyu, and W. Anmin, “K. Lange, *Handbook of Metal Forming*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1985.” *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 18225, Aug. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-68733-9.

- [11] J. M. Costa, E. W. Sequeiros, D. Figueiredo, A. R. Reis, and M. F. Vieira, “Additive Manufacturing – Present and Sustainable Future, Materials and Applications,” in *IntechOpen Series*, I. Montealegre–Melendez, Ed., 2024, pp. 181–190.
- [12] B. R. Hunde and A. D. Woldeyohannes, “Future Prospects of Computer–Aided Design (CAD) – A Review from the Perspective of Artificial Intelligence (AI), Extended Reality, and 3D Printing,” *Results in Engineering*, vol. 14, p. 100478, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100478.
- [13] K. Opalach, J. Porter–Sobieraj, and P. Zdroik, “Stacking Optimization of 3D Printed Continuous Fiber Layer Designs,” *Advances in Engineering Software*, vol. 164, p. 103077, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.advengsoft.2021.103077.
- [14] S. M. Desai, R. Y. Sonawane, and A. P. More, “Thermoplastic Polyurethane for Three-Dimensional Printing Applications: A Review,” *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 34, no. 7, pp. 2061–2082, Mar. 2023, doi: 10.1002/pat.6041.
- [15] V. Chahal and R. M. Taylor, “A Review of Geometric Sensitivities in Laser Metal 3D Printing,” *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 15, no. 2, pp. 227–241, Feb. 2020, doi: 10.1080/17452759.2019.1709255.
- [16] J. Nyika, F. M. Mwema, R. M. Mahamood, E. T. Akinlabi, and T. Jen, “Advances in 3D Printing Materials Processing–Environmental Impacts and Alleviation Measures,” *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 8, no. sup3, pp. 1275–1285, Jun. 2021, doi: 10.1080/2374068x.2021.1945311.
- [17] G. Y. G. Rodriguez, C. M. G. Díaz, and S. Dahiya, “Personalized Medicine: Perspectives on Innovations and Challenges in 3D Printing, Continuous Manufacturing and On–Demand Production,” *Discover Pharmaceutical Sciences*, vol. 1, no. 1, Jul. 2025, doi: 10.1007/s44395–025–00011–7.
- [18] K. Mikula et al., “3D Printing Filament as a Second Life of Waste Plastics—A Review,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 10, pp. 12321–12333, Sep. 2020, doi: 10.1007/s11356–020–10657–8.
- [19] C. Lv, H. Shen, J. Liu, D. Wu, E. Qu, and S. Liu, “Properties of 3D Printing Fiber–Reinforced Geopolymers Based on Interlayer Bonding and Anisotropy,” *Materials*, vol. 15, no. 22, p. 8032, Nov. 2022, doi: 10.3390/ma15228032.
- [20] M. Doshi, A. Mahale, S. K. Singh, and S. Deshmukh, “Printing Parameters and Materials Affecting Mechanical Properties of FDM–3D Printed Parts: Perspective and Prospects,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 50, pp. 2269–2275, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.003.
- [21] Y. Mittal et al., “A Mechanistic Model for Overhang Limits in Additive Manufacturing,” *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 10, no. 10, pp. 8775–8794, May 2025, doi: 10.1007/s40964–025–01154–w.
- [22] K. Yu, Q. Gao, L. Lu, and P. Zhang, “A Process Parameter Design Method for Improving the Filament Diameter Accuracy of Extrusion 3D Printing,” *Materials*, vol. 15, no. 7, p. 2454, Mar. 2022, doi: 10.3390/ma15072454.

- [23] Y. Yang, Y. Wang, B. Xue, C. Wang, and B. Yang, “Optimization of Fused Deposition Modeling Parameters for Mechanical Properties of Polylactic Acid Parts Based on Kriging and Cuckoo Search,” *Aerospace*, vol. 12, no. 1, p. 38, Jan. 2025, doi: 10.3390/aerospace12010038.
- [24] A. Tsiolikas, T. Spahiu, and J. D. Kechagias, “Experimental Investigation of Build Time During ABS Filament Material Extrusion Process,” in *Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering*, 2024, pp. 339–345, doi: 10.1007/978-3-031-48933-4_33.
- [25] X. Wei et al., “Geometric Accuracy and Dimensional Precision in 3D Printing-Based Gear Manufacturing: A Study on Interchangeability and Forming Precision,” *Polymers*, vol. 17, no. 3, p. 416, Feb. 2025, doi: 10.3390/polym17030416.
- [26] S. D. Dipta, Md. M. Rahman, Md. J. Ansari, and Md. N. Uddin, “A Comprehensive Review of Sustainable and Green Additive Manufacturing: Technologies, Practices, and Future Directions,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 9, no. 8, p. 269, Aug. 2025, doi: 10.3390/jmmp9080269.
- [27] J. J. Nijdam, D. Agarwal, and B. S. Schon, “An Experimental Assessment of Filament-Extrusion Models Used in Slicer Software for 3D Food-Printing Applications,” *Journal of Food Engineering*, vol. 317, p. 110711, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110711.
- [28] K. Lange, *Handbook of Metal Forming*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1985.

การลดเวลาในขั้นตอนของการขัดผิวชิ้นงานในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนจากโลหะผง

Reducing the Time Required for Surface Finishing
in the Powder Metallurgy Industryสมพงษ์ พิริยานนท์¹ ภูริดา ปินโต¹ ธีรชาติ นุสโส¹ พิพัฒน์ สุจิตธรรมกุล¹ และ พีรวิทย์ โชคเหมาะ^{2*}¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ 217 ถนนนันทบุรี ต.สวนใหญ่ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000

²สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

Sompong Piriyayon^{1*} Purida Pinto¹ Teerachart Nusso¹ Pipat Sujitthammakul¹ and Peerawit Chokemorh²¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi 217 Nonthaburi Road, Suan Yai subdistrict, Mueang

Nonthaburi district, Nonthaburi province 11000

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus 150 Srichan Road, Nai Meuang subdistrict,

Mueang District, Khon Kaen province 40000

*Corresponding author Email: peerawit.ch@rmuti.ac.th

(Received: June 8, 2026; Revise: June 29, 2026; Accepted: June 29, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดเวลามาตรฐานที่เหมาะสมในการขัดผิวชิ้นงานโลหะ จากกระบวนการโลหะผง วิทยา โดยใช้เครื่องขัดแบบสั่นสะเทือนที่ใช้วัสดุขัดเซรามิก เพื่อแก้ไขปัญหาการไม่มีมาตรฐานเวลาที่ชัดเจนในขั้นตอนของการลบครีบกมและขัดผิวชิ้นงาน ที่พนักงานตั้งเวลาการขัดโดยอิงจากประสบการณ์และการบอกกล่าวจากพนักงานที่เคยปฏิบัติงาน เฉลี่ย 60 นาทีต่อรอบ ส่งผลให้เกิดต้นทุนการผลิตสูงขึ้นและสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น ผลการทดลองพบว่าสามารถลดเวลามาตรฐานในขั้นตอนการขัดผิวจากเดิม 60 นาที เหลือเพียง 50 นาที หรือลดลง 16.67% โดยที่คุณภาพผิวของชิ้นงานที่ไม่มีครีบกมและผิวเรียบ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด

คำสำคัญ: โลหะผงวิทยา เวลามามาตรฐาน การลดต้นทุน

Abstract

This study proposes to establish an optimal standard time for surface finishing of metal workpieces using the powder metallurgy process by a vibrating polisher with ceramic abrasive materials. This addresses the problem of the lack of clear time standards for the deburring and surface finishing steps, where employees typically set times based on experience and feedback from previous workers, averaging 60 minutes per cycle. This results in higher production costs and unnecessary energy waste. The experiment showed that the standard polishing time could be reduced from 60 minutes to just 50 minutes, or

approximately 16.67%, while the resulting surface quality, free of sharp burrs and smooth, passed the customer's standards requirements.

Keywords: Powder Metallurgy, Standard Time, Cost Reduction

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนโลหะที่มีความเที่ยงตรงสูง (Precision Manufacturing) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคส่วนอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ กระบวนการปรับปรุงสภาพผิวชิ้นงาน (Surface Finishing Process) ถือเป็นขั้นตอนขั้นปลาย (Downstream Process) ที่มีความสำคัญเชิงกลยุทธ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพเชิงมิติ ความเรียบเนียนเชิงมหภาค (Surface Roughness) และความสวยงามทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย ในปัจจุบัน แนวทางการปรับปรุงสภาพผิวที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ประกอบด้วย การปรับปรุงสภาพผิวด้วยกำลังแรงงานคน (Manual Finishing) การขัดด้วยเครื่องจักรกลเฉพาะทาง (Conventional Machining) และการขัดผิวด้วยระบบสั่นสะเทือน (Vibratory Finishing) ซึ่งแต่ละระเบียบวิธีต่างมีข้อได้เปรียบและข้อจำกัดเชิงเทคนิคที่แตกต่างกันไปตามลักษณะการประยุกต์ใช้งาน [1-6]

จากการศึกษาวิจัยและสำรวจเชิงลึกในกระบวนการผลิตภายในโรงงานกรณีศึกษา พบว่ากระบวนการปรับปรุงสภาพผิวชิ้นงานยังคงประสบปัญหาการขาดมาตรฐานเวลาการปฏิบัติงานที่ชัดเจน (Standard Time) พนักงานผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่จึงอาศัยการตัดสินใจบนพื้นฐานของประสบการณ์ส่วนบุคคลและสัญชาตญาณ (Heuristic Decision-Making) ส่งผลให้เกิดการกำหนดระยะเวลาการทำงานที่มากเกินไป (Over-processing) เพื่อประกันความเสี่ยง จากการเก็บข้อมูลเชิงประจักษ์พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการขัดผิวเฉลี่ยในปัจจุบันอยู่ที่ 60 นาทีต่อรอบการทำงาน โดยกระบวนการดังกล่าวขาดการตรวจสอบคุณภาพระหว่างกระบวนการ (In-process Inspection) เพื่อประเมินความสอดคล้องกับเกณฑ์ข้อกำหนด (Quality Conformance) การไร้ซึ่งมาตรฐานเวลาและระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพนี้ นำไปสู่ความสูญเปล่าในกระบวนการผลิต (Manufacturing Wastes) ทั้งในมิติของเวลา (Waiting Time) และการใช้พลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งส่งผลกระทบเป็นลูกโซ่ทำให้ต้นทุนการผลิตส่วนเพิ่ม (Incremental Cost) สูงขึ้น และประสิทธิภาพประสิทธิผลโดยรวมของอุปกรณ์ (Overall Equipment Effectiveness: OEE) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้ การศึกษาและพัฒนาแนวทางเชิงระบบเพื่อลดระยะเวลาในกระบวนการขัดผิวด้วยเครื่องสั่นสะเทือนจึงเป็นประเด็นเร่งด่วนในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกระบวนการและลดต้นทุนการผลิต

งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา วิเคราะห์ และกำหนดมาตรฐานเวลาที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Standard Time) สำหรับกระบวนการปรับปรุงสภาพผิวชิ้นงานโลหะผง (Powder Metallurgy Components) ด้วยเครื่องขัดระบบสั่นสะเทือน โดยนำระเบียบวิธีวิจัยเชิงทดลองร่วมกับการสุ่มตรวจวัดคุณภาพระหว่างกระบวนการเป็นระยะ (Periodic In-process Sampling) มาประยุกต์ใช้ เพื่อระบุจุดอิ่มตัวของการปรับปรุงสภาพผิว (Saturation Point) ซึ่งเป็นจุดที่ชิ้นงานบรรลุเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพตามข้อกำหนดและสามารถยุติกระบวนการขัดได้ทันที แนวทางดังกล่าวนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในสายการผลิตและลดการใช้พลังงานส่วนเกินแล้ว ยังช่วยยกระดับการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้มีความสอดคล้องกับความต้องการของตลาดที่มีการแข่งขันสูงในปัจจุบัน การปรับปรุงกระบวนการขัดผิวชิ้นงานให้มีความเป็นเลิศในการดำเนินงาน (Operational Excellence) นี้ จะส่งเสริมให้โครงสร้างกระบวนการผลิตในภาพรวมมีความยืดหยุ่น (Lean and Agile Manufacturing) ลดรอบเวลาการทำงาน (Lead Time) ลดต้นทุนต่อหน่วย (Unit Cost) และเป็นการสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันอย่างยั่งยืนให้แก่องค์กรในยุคอุตสาหกรรมแห่งอนาคต

2. วิธีการดำเนินงาน

ระเบียบวิธีวิจัยในบทความฉบับนี้ ครอบคลุมขั้นตอนการดำเนินงานเชิงระบบอย่างเป็นขั้นตอน ประกอบด้วย การวางแผนและการออกแบบกระบวนการทำงาน (Process Planning and Design) การเตรียมวัสดุศาสตร์และอุปกรณ์ทดลอง (Materials and Equipment Preparation) การดำเนินการทดสอบเชิงทดลอง (Experimental Execution) การบันทึกและรวบรวมข้อมูลเชิงประจักษ์ (Data Acquisition) ตลอดจนการประเมินผลการทดลอง (Statistical Data Analysis and Evaluation)

2.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

2.1.1 เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดลองนี้คือ เครื่องปรับปรุงสภาพผิวชิ้นงานแบบสั่นสะเทือนชนิดอ่างกลม (Circular Bowl Vibratory Finishing Machine) ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดกำลัง 3.7 กิโลวัตต์ (kW) แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 380 โวลต์ (V) และมีปริมาตรความจุของถังสั่นรวม 300 ลิตร โดยระบบดังกล่าวถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการไหลเวียนของเม็ดขัดและชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ รายละเอียดทางกายภาพและโครงสร้างของอุปกรณ์ดังกล่าวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องขัดผิวแบบสั่นสะเทือน (Circular Bowl Vibratory Finishing Machine)

2.1.2 สารเร่งปฏิกิริยาและสารตัวพาในกระบวนการ (Process Compound and Carrier Liquid) ในการทดลองนี้ได้มีการประยุกต์ใช้น้ำมันดีเซล (Diesel Fuel) ในปริมาณครั้งที่ 3 ลิตร เพื่อทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นและสารพาหะ (Alternative Liquid Compound) ทดแทนสารเคมีขัดผิวสำเร็จรูปในอุตสาหกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการเสียดทาน ลดความร้อนสะสมในระเบียบวิธีวิจัย และช่วยในการชะล้างเศษอนุภาคโลหะขนาดเล็กที่หลุดออกจากผิวชิ้นงานในระหว่างกระบวนการขัดสั่นสะเทือน

2.1.3 อุปกรณ์ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวเชิงทัศนศาสตร์ (Optical Inspection Equipment) แวนขยายความละเอียดสูง (Optical Magnifier) ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือขั้นต้นในการตรวจสอบและประเมินลักษณะทางกายภาพสภาพของผิว (Surface Topography) และความบกพร่องบนพื้นผิวชิ้นงานโลหะผงในระหว่างกระบวนการขัด (In-process Visual Inspection) เพื่อวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างแม่นยำ โดยผู้ชำนาญการของสถานประกอบการเป็นผู้กำหนดผลขั้นตอนสุดท้ายว่า “ผ่าน” และ “ไม่ผ่าน”

2.1.4 วัสดุขัดผิวประเภทเซรามิก (Ceramic Abrasive Media) รูปทรงกระบอกตัดเฉียง (Angle-Cut Cylinder) ซึ่งมีขนาดมิติตามเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเท่ากับ 5x10 มิลลิเมตร เม็ดขัดชนิดนี้มีคุณสมบัติเด่นในด้านความหนาแน่นสูงและความทนทานต่อการสึกหรอ เหมาะสำหรับการลบคม (Deburring) และการปรับปรุงความเรียบเนียนของชิ้นงานโลหะผง โดยลักษณะทางกายภาพและรูปทรงของเม็ดขัดดังกล่าวได้แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะของเม็ดขัดเซรามิก (Ceramic Abrasive Media) ทรงกระบอกตัดเฉียง ขนาด 5x10 มิลลิเมตร

2.1.5 ชิ้นงานทดสอบจากกระบวนการโลหะวิทยาผง (Powder Metallurgy Test Specimens) ชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ คือชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นรูปและผ่านการเผาผนึก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามข้อกำหนดการออกแบบเท่ากับ 19 มิลลิเมตร โดยลักษณะทางกายภาพ มิติสัณฐาน เริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบได้แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการโลหะผง

2.2 การเก็บข้อมูล

การวิเคราะห์ขั้นต้นเริ่มต้นด้วยการศึกษากระบวนการทศน์และเกณฑ์มาตรฐานพื้นฐาน (Baseline Data) ในกระบวนการปรับปรุงสภาพผิวชิ้นงานโลหะของ บริษัท เคเพาเตอร์เมทัล จำกัด โดยชิ้นงานทดสอบที่นำมาศึกษาเป็นชิ้นงานโลหะผงที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compacting) และผ่านกระบวนการเผาผนึกทางความร้อน (Sintering Process) เป็นที่เรียบร้อยแล้ว เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงทดลอง

ในส่วนของระเบียบวิธีทดลอง การดำเนินการขัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องปรับปรุงสภาพผิวระบบสั่นสะเทือนจะถูกกำหนดให้ทำงานแบบต่อเนื่องภายใต้สภาวะควบคุม จากนั้นจะใช้ระเบียบวิธีการสุ่มตัวอย่างในระหว่างกระบวนการ (In-process Sampling) โดยการสุ่มหยิบชิ้นงานทดสอบจากถังขัดจำกัดจำนวนครั้งละ 5 ชิ้น ในทุกช่วงรอบเวลา 5 นาที (Time Interval) สอดคล้องตามแผนภาพขั้นตอนการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4 โดยเริ่มดำเนินการเก็บข้อมูลตั้งแต่ชิ้นงานเริ่มต้น (นาที่ที่ 0) จนถึงระยะเวลารวม 60 นาที เพื่อพิสูจน์ทราบและระบุตำแหน่งเวลาเชิงหน้าที่ (Functional Time) ที่ทำให้ชิ้นงานผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดคุณภาพทางเทคนิคของลูกค้า

ระเบียบวิธีการสุ่มตัวอย่างเชิงทดลองนี้จะดำเนินต่อไปอย่างเป็นระบบ จนกระทั่งผลการตรวจสอบเชิงสถิติแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างที่สุ่มตรวจทั้งหมดในรอบเวลานั้น ๆ (จำนวน 5 จาก 5 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 100) ผ่านเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำอย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงจะทำการบันทึกค่าเวลาดังกล่าวเพื่อนำไปกำหนดเป็นเวลามาตรฐานใหม่ที่เหมาะสมที่สุด (Optimized Standard Time) สำหรับกระบวนการผลิต ในส่วนของกรรมวิธีการประเมินผล คุณภาพผิวชิ้นงานจะถูกตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) ร่วมกับการใช้อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ เพื่อประเมินความสม่ำเสมอเชิงโครงสร้างผิว ความเรียบเนียน และการมีอยู่ของครีบกม (Burs) ทั้งนี้ เพื่อขจัดความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากอคติส่วนบุคคล (Subjective Bias) และประกันความถูกต้องแม่นยำของผลลัพธ์ การประเมินผลทั้งหมดจึงถูกดำเนินการร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการควบคุมคุณภาพ (Quality Control Expert) ของสถานประกอบการ เพื่อให้มั่นใจว่าการตัดสินใจตัดสินและทวนสอบผลการทดลอง (Validation) เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานสากลและข้อกำหนดของอุตสาหกรรมอย่างแท้จริง



รูปที่ 4 ทำการสุ่มหยิบชิ้นงานจากถังขัด

3. ผลการวิจัย

การทดสอบเชิงทดลองในส่วนนี้ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อระบุและวิเคราะห์ระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Processing Time) ที่ส่งผลให้ชิ้นงานทดสอบบรรลุเกณฑ์ข้อกำหนดด้านคุณภาพอย่างสมบูรณ์ โดยระเบียบวิธีทดลองได้กำหนดให้มีการสุ่มตรวจวัดคุณภาพชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้นต่อการอบการทดลอง ในทุกช่วงเวลาสม่ำเสมอที่ 5 นาที (Periodic 5-Minute Time Interval) นับตั้งแต่สภาวะเริ่มต้นก่อนการปรับปรุงสภาพผิว (นาฬิกาที่ 0) ไปจนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาสิ้นสุดตามเกณฑ์ปฏิบัติเดิมของพนักงานผู้ปฏิบัติงานคือ 60 นาที (Baseline Operational Time)

การประเมินและการทวนสอบคุณภาพชิ้นงาน จะอ้างอิงและดำเนินการภายใต้กรอบมาตรฐานระบบบริหารงานคุณภาพ ISO 9001 และตามความต้องการของลูกค้าของสถานประกอบการกรณีศึกษา โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดเชิงคุณภาพเกณฑ์สมบูรณ์ ได้แก่ การตรวจสอบการหลงเหลืออยู่ของครีบกม (Burr Disappearance) และการประเมินสภาพลักษณะพื้นผิวในมิติต่าง ๆ (Surface Topology and Quality Status) ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถจำแนกพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงและจุดอิ่มตัวเชิงกระบวนการ (Process Saturation Point) ได้อย่างแม่นยำ ผลการวิเคราะห์เชิงทดลองและระดับอัตราการผ่านเกณฑ์การควบคุมคุณภาพในแต่ละช่วงเวลา ได้ถูกรวบรวมและแสดงสรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการตรวจสอบตามเกณฑ์คุณภาพของชิ้นงานโดยผู้ชำนาญการของสถานประกอบการ

เวลา (นาที)	คุณภาพชิ้นงาน	ผ่านเกณฑ์	ผล
0 – 35	มีครีบกม ผิวไม่เรียบ	0/5	ไม่ผ่าน
40	มีครีบกมเล็กน้อย, ผิวเรียบ	0/5	ไม่ผ่าน
45	มีครีบกมเล็กน้อย, ผิวเรียบ	4/5	ไม่ผ่าน
50	ไม่มีครีบกม ผิวเรียบ	5/5	ผ่าน
55	ไม่มีครีบกม ผิวเรียบ	5/5	ผ่าน
60	ไม่มีครีบกม ผิวเรียบ	5/5	ผ่าน



รูปที่ 5 ลักษณะของชิ้นงานก่อนขัด 0 นาที



รูปที่ 6 ลักษณะของชิ้นงานหลังขัด 50 นาที



รูปที่ 7 ลักษณะของชิ้นงานหลังขัด 55 นาที

4. อภิปรายผล

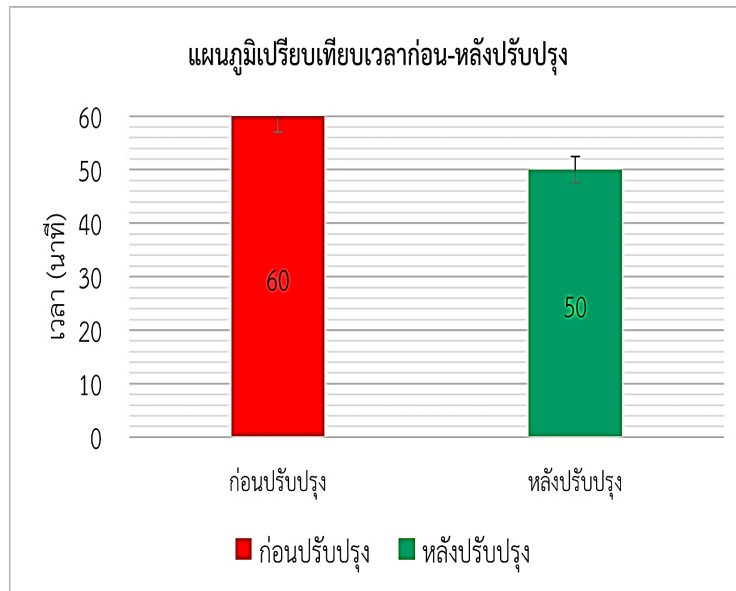
จากผลการทดลองในตารางที่ 1 สามารถอภิปรายผลได้ 3 ประเด็นหลัก ดังนี้

4.1 ช่วงเวลาที่ยังไม่เพียงพอ (0-40 นาที) ในช่วง 0-40 นาทีแรกของการขัด ชิ้นงานที่สุ่มมาทั้งหมดไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (0/5 ชิ้น) แม้ว่าสภาพผิวจะเริ่มเรียบขึ้นหลังจาก 30 นาที แต่จากการตรวจสอบด้วยการสัมผัสและใช้แว่นขยาย ยังคงพบครีบกขนาดเล็ก (Micro-burrs) หลงเหลืออยู่บริเวณขอบชิ้นงาน (ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5) ส่วนที่ช่วงเวลา 45 นาที ยังพบว่ามีบางส่วนที่ยังไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพอย่างสมบูรณ์ (4/5)

4.2 ช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Point) ที่ 50 นาที จุดเปลี่ยนสำคัญเกิดขึ้นที่เวลา 50 นาที ซึ่งเป็นครั้งแรกที่ชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้น (5/5 ชิ้น) ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพของลูกค้า ดังแสดงในรูปที่ 6 ชิ้นงานมีสภาพผิวเรียบสม่ำเสมอ และไม่พบครีบกหลงเหลืออยู่เมื่อตรวจสอบด้วยแว่นขยาย นี่คือการจุดที่กระบวนการขัดผิวบรรลุวัตถุประสงค์ด้านคุณภาพแล้ว

4.3 ช่วงเวลาที่เกินความจำเป็น (Over processing) ที่ 55 นาที เป็นต้นไป เมื่อทดสอบชุดต่อที่เวลา 55 นาที ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าชิ้นงานยังคงมีคุณภาพ “ผ่าน” มาตรฐาน แต่จากการเปรียบเทียบ ไม่พบความแตกต่างเชิงคุณภาพที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ 50 นาที

จากการกำหนดเวลามาตรฐานใหม่เป็น 50 นาที ทำให้สามารถลดเวลาในกระบวนการขัดผิวลงจากเดิม 60 นาที หรือลดลง 10 นาทีต่อรอบ เมื่อนำค่านี้ไปคำนวณ จะได้ผลคือ เปอร์เซ็นต์การลดเวลา: $(10\text{ นาที}/60\text{ นาที}) \times 100\% = 16.67\%$



รูปที่ 8 แผนภูมิการเปรียบเทียบเวลาก่อนและหลังการปรับปรุง

จากการทดลอง พบว่าสามารถลดเวลาการขัดผิวชิ้นงานได้ถึง 10 นาที จาก 60 นาที เหลือเพียง 50 นาที ดังแสดงในแผนภูมิ รูปที่ 8 โดยที่คุณภาพของชิ้นงานผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกอย่างที่สถานประกอบการต้องการ

5. สรุป

บนพื้นฐานของผลลัพธ์เชิงประจักษ์ ที่ได้จากการศึกษาและการทดสอบกระบวนการปรับปรุงสภาพผิวชิ้นงานด้วยระบบสันสะเทือน บทความวิจัยฉบับนี้สามารถสรุปผลการดำเนินงานจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงพฤติกรรมของรอบเวลาการขัดผิวในช่วงระยะเวลา 0 ถึง 60 นาที ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการทดลองบ่งชี้อย่างเด่นชัดว่า ระยะเวลาในการปรับปรุงสภาพผิวที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Processing Time) คือ 50 นาที ซึ่ง ณ ช่วงเวลาดังกล่าว ชิ้นงานทดสอบสามารถรักษาระดับคุณภาพทางกายภาพและมิติสัณฐานผิวให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่ถูกกำหนด โดยผู้ชำนาญการตรวจสอบของสถานประกอบการที่ทำการผลิตชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์

จากการค้นพบดังกล่าว สถานประกอบการกรณีศึกษาจึงสามารถนำผลการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดค่ามาตรฐานเวลาปฏิบัติงานใหม่ (Optimized Standard Time) ที่ระดับ 50 นาทีต่อรอบการทำงาน ซึ่งการปรับปรุงกระบวนการในครั้งนี้ส่งผลให้สามารถลดรอบเวลาในการขัดผิวชิ้นงานลงจากเกณฑ์ปฏิบัติเดิม (Baseline Time) ที่เคยใช้เวลา 60 นาที ลงได้ทั้งสิ้น 10 นาที คิดเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพด้านเวลาและลดระยะเวลาในกระบวนการผลิต (Lead Time Reduction) ได้สูงถึงร้อยละ 16.67 ซึ่งการลดลงของสัดส่วนเวลาดังกล่าวย่อมส่งผลดีเชิงบวกต่อการลดการใช้พลังงานในระบบ และการเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตรวม (Production Capacity) ขององค์กรในภาพรวมอย่างยิ่ง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์ชิ้นงาน กระบวนการ และสิ่งอำนวยความสะดวก จากบริษัท เค เพาเดอร์ เมทัล จำกัด พร้อมด้วยห้องปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น และห้องปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Fang and Y. Zhang, “Recent Developments in Vibratory Finishing Technology: Materials, Media, and Process Optimization,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 297, p. 117276, 2022.
- [2] P. Müller et al., “Alternative Lubricants and Fluids in Surface Finishing Processes,” *Procedia CIRP*, vol. 108, pp. 45–50, 2023.
- [3] P. T. Nguyen, “Media Geometry and its Influence on Deburring Efficiency in Vibratory Systems,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 122, pp. 243–252, 2024.
- [4] M. Rahman and S. Nair, “A Study on Polishing Behavior of Fine Spherical Media in Vibratory Bowl Finishing,” *Procedia CIRP*, vol. 108, pp. 442–447, 2022.
- [5] Sundar, “Powder Metallurgy Process,” ExtrudeDesign.com. <https://extrudesign.com/powder-metallurgy-process/> (accessed May 20, 2025).
- [6] L. Zhang, Y. Li, and C. Wang, “Effect of Ceramic Media Shape on Surface Roughness and Material Removal in Vibratory Finishing,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 68, pp. 1–9, 2023.

การเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอของชิ้นส่วนความเร็วสูง ด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

Thermal Spray Coating Enhancing the Wear Resistance Performance of High-Speed Components by Using Thermal Spray Coating Technique

รวินท์ธันต์ ทิพย์เสนา¹ เอการัต ใจบุญ^{1*}, วิษณุ แฟงเมือง¹ ภัทรพงศ์ เกิดลาภ¹ ณัฐชานันท์ อังศุเรณีย์¹

เอกวิศว์ สงเคราะห์¹ สิทธิกร ทรัพย์ประดิษฐ์¹ วีรภัทร พากเพียร¹ และ ชัยยนต์ ใจบุญมา²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบราง วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

Rawintanath Thipsena¹ Eakarath Jaiboon,^{1*} Wisanu Fangmuang¹, Phattharaphong Kiedlaphi¹

Natchanun Angsuseranee¹, Ekawit Songkroh¹, Sittikorn Sappradid¹, Werapat Pakpren¹

and Chaiyun Jaiboonma²

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

²Department of Mechanical and Railway Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Hantra, Phra Nakhon Si Ayutthaya,

Phra Nakhon Si Ayutthaya 13000

*Corresponding author E-mail: eakarath.j@rmutsb.ac.th

(Received: June 16, 2026; Revise: June 29, 2026; Accepted: June 29, 2026)

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอของชิ้นส่วนที่ทำงานภายใต้สภาวะความเร็วสูง โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพ่นเคลือบผิวด้วยความร้อน (Thermal Spray Coating) เพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มสมรรถนะของชิ้นส่วนทางวิศวกรรม วัสดุฐานที่ใช้ในการศึกษา คือ อลูมิเนียมอัลลอยด์ 6061 ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงเหมาะสม โดยใช้ลวดพ่นชนิด Ni_5Al_5 เป็นชั้นรองประสาน (Bond Coat) และใช้วัสดุเคลือบผิวชนิด $\text{WC}_{10}\text{Co}_4\text{Cr}$ เป็นชั้นเคลือบหลัก (Top Coat) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของพื้นผิวกระบวนการเคลือบผิวประกอบด้วย การพ่นชั้นรองประสานด้วยเทคนิค Wire Arc Spray และการพ่นชั้นเคลือบหลักด้วยเทคนิค High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถสร้างชั้นเคลือบที่มีความหนาแน่นสูงและมีการยึดเกาะกับวัสดุฐานได้ดี หลังจากการพ่นเคลือบ ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางจุลภาคของชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พร้อมทั้งตรวจวัดความหนาของชั้นเคลือบ และทดสอบค่าความแข็งของผิวเคลือบเพื่อประเมินคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ได้ผลการศึกษาพบว่า การเคลือบผิวด้วยระบบ $\text{Ni}_5\text{Al}_5/\text{WC}_{10}\text{Co}_4\text{Cr}$ สามารถเพิ่มความแข็งแรงของพื้นผิวได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ชิ้นงานมีศักยภาพในการต้านทานการสึกหรอและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานในชิ้นส่วนที่ต้องรับแรงเสียดทานหรือทำงานภายใต้สภาวะที่รุนแรง นอกจากนี้ โครงสร้างของชั้นเคลือบมีการยึดเกาะกับวัสดุฐานอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และมีความต่อเนื่องของชั้นเคลือบตลอดพื้นที่การพ่น

คำสำคัญ: การสึกหรอ ชิ้นส่วนความเร็วสูง พ่นเคลือบด้วยความร้อน

Abstract

This research project aimed to investigate the enhancement of wear resistance in high-speed mechanical components through the application of Thermal Spray Coating technology to extend service life and improve engineering performance. The substrate material used in this study was Aluminum Alloy 6061, which is widely employed in industrial applications due to its lightweight characteristics, excellent mechanical strength, and good machinability. A $\text{Ni}_{95}\text{Al}_5$ alloy wire was employed as the bond coat to enhance the adhesion between the substrate and the coating layer, while $\text{WC}_{10}\text{Co}_4\text{Cr}$ was applied as the top coat to improve surface hardness and wear resistance. The coating process consisted of depositing the bond coat using the Wire Arc Spray technique, followed by the application of the top coat using the High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) spraying process. This combination of coating techniques is capable of producing a dense coating layer with excellent adhesion to the substrate. After the coating process, the microstructure of the coating layer was characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM). The coating thickness was measured, and the surface hardness was evaluated to determine the mechanical properties and overall coating quality. The experimental results revealed that the $\text{Ni}_{95}\text{Al}_5/\text{WC}_{10}\text{Co}_4\text{Cr}$ coating system significantly increased the surface hardness of the Aluminum Alloy 6061 substrate, thereby enhancing its wear resistance and making it suitable for engineering components operating under severe frictional and high-speed conditions. Furthermore, microstructural analysis demonstrated that the coating exhibited good adhesion to the substrate, a continuous coating structure throughout the sprayed area, and a relatively uniform distribution of coating particles. These findings indicate that the selected thermal spray processes are effective in producing high-quality protective coatings with considerable potential for industrial applications requiring improved surface durability and wear performance.

Keywords: Wear Resistance, High-Speed Components, Thermal Spray Coating Technique

1. บทนำ

การสึกหรอ หรือ การชำรุดเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในเครื่องจักรและโครงสร้างทางวิศวกรรมการเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน การเลือกกระบวนการปรับปรุง คุณภาพของวัสดุที่มีประสิทธิภาพตลอดจนความเข้าใจในธรรมชาติของการสึกหรอและการเลือกวิธีการซ่อมบำรุงที่ถูกต้องอย่างเหมาะสม จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นพื้นฐานสำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานและการบำรุงรักษาสำหรับการสึกหรอของชิ้นส่วนของเครื่องจักรอุตสาหกรรมบางชนิดสามารถทำการซ่อมแซมให้กลับมาใช้งานได้ดังเดิมด้วยวิธีการต่าง ๆ อาทิการเชื่อม หรือการพ่นพอก (Thermal' Spraying) โดยปัจจุบันการซ่อมแซมชิ้นส่วนของเครื่องจักรอุตสาหกรรมด้วยวิธีการพ่นพอกได้รับความนิยม กรรมวิธีการซ่อมดังกล่าวสามารถเลือกวิธีการได้หลากหลาย ให้เหมาะสมต่อลักษณะการใช้งานของชิ้นส่วนที่ต้องการซ่อม

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

เตรียมวัสดุฐานโดยใช้อลูมิเนียม 6061 จากนั้นทำการตัดชิ้นงานและปรับสภาพผิวด้วยกระบวนการ Sandblasting เพื่อเตรียมพื้นผิวให้เหมาะสมสำหรับการพ่นเคลือบผิว และตรวจสอบความหยาบผิวด้วย Testex Press-O-Film และวัดค่าด้วย Dial Thickness Gauge เพื่อให้ได้พื้นผิวที่เหมาะสมก่อนทำการเคลือบจากนั้นเตรียมวัสดุเคลือบโดยใช้ลวด $\text{Ni}_{95}\text{Al}_5$ และ

ผง $WC_{10}Co_4Cr$ นำไปพ่นเคลือบด้วยเครื่อง Arc Spray และ HVOF ก่อนการพ่นจริงจะทำการพ่นรองพื้นด้วย $Ni_{20}Cr$ (Nickel–Chromium) ความหนาประมาณ 50–100 μm เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของชั้นเคลือบกับผิวชิ้นงาน จากนั้นพ่นเคลือบที่อุณหภูมิประมาณ 80–120 องศาเซลเซียส โดยรักษาระยะห่างระหว่างหัวพ่นกับชิ้นงานประมาณ 15 นิ้ว และควบคุมความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 200–400 μm หลังจากพ่นเคลือบเสร็จแล้ว ทำการตัดชิ้นงานและเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติของชั้นเคลือบ ได้แก่ การตรวจสอบโครงสร้างผิว SEM และทดสอบความแข็งของชั้นเคลือบด้วย Hardness Test เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการเคลือบผิววัสดุ

2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

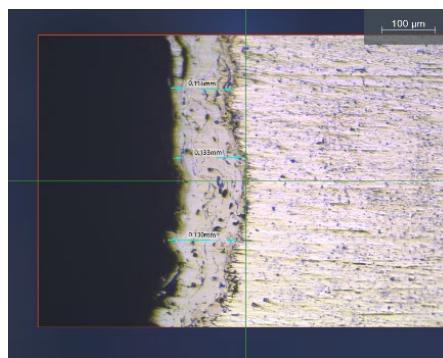
การทดสอบด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) ใช้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างผิวและหน้าตัดของชั้นเคลือบหลังการพ่น ด้วยการใช้ลำอิเล็กตรอนกำลังสูงเพื่อแสดงภาพกำลังขยายสูงการทดสอบนี้ใช้เพื่อวิเคราะห์ความหนาชั้นเคลือบความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบการยึดเกาะกับวัสดุฐานรูพรุนและรอยแตกร้าวของชั้นเคลือบ

ตารางที่ 1 ผลการวัดชั้นผิวเคลือบโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope

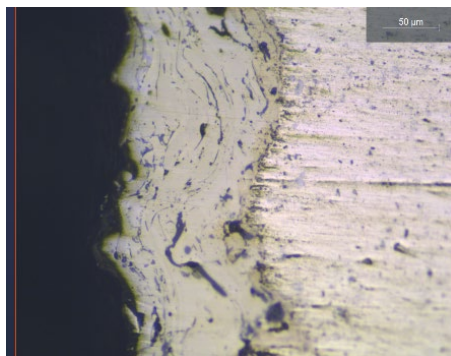
ชิ้นงาน	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย
Arc Spray	0.116	0.133	0.130	126 μm
HVOF	0.073	0.056	0.073	67 μm



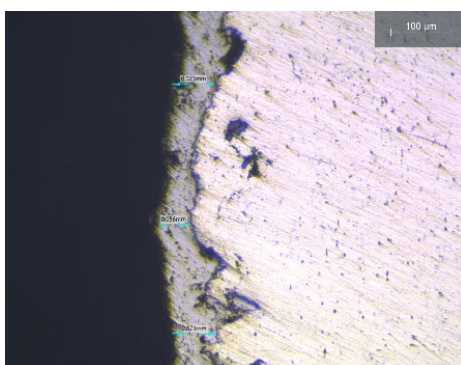
รูปที่ 1 เครื่องมือ Scanning Electron Microscope



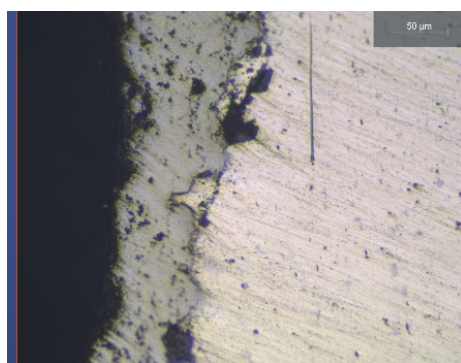
รูปที่ 2 การเคลือบ Arc Spray ขยาย x10



รูปที่ 3 การเคลือบ HVOF ขยาย x10

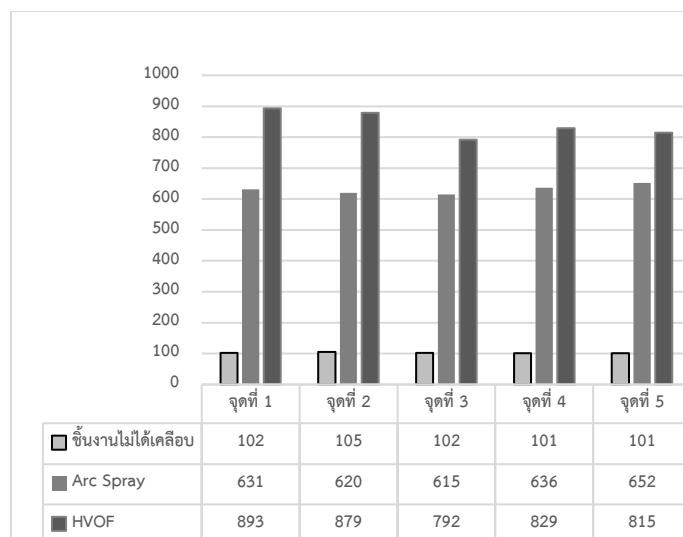


รูปที่ 4 การเคลือบ HVOF ขยาย x20



รูปที่ 5 ทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของชั้นเคลือบในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers Hardness Test) โดยทำการกดหัวกดเพชรรูปทรงพีระมิดลงบนพื้นผิวของชิ้นงานด้วยแรงกด 0.2 กิโลกรัม (0.2 kgf หรือ 200 gf) จากนั้นวัดขนาดรอยกดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์ของเครื่องทดสอบ เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความแข็งของวัสดุ การใช้แรงกด 0.2 กิโลกรัม เหมาะสำหรับการทดสอบชั้นเคลือบที่มีความบาง เนื่องจากช่วยลดผลกระทบจากวัสดุฐาน และทำให้สามารถวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบได้อย่างแม่นยำมากขึ้น โดยทำการทดสอบหลายตำแหน่งบนชิ้นงานแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น หัวกดที่ใช้เป็น เพชรแท้คุณภาพสูง (Diamond) รูปทรงพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Vicker Qness) มุม 136 องศา เนื่องจากเพชรมีความแข็งสูง ไม่สึกหรอ และสามารถสร้างรอยกดขนาดเล็กที่ชัดเจน เหมาะสำหรับการทดสอบความแข็งของชั้นเคลือบบาง ทำให้วัดค่าได้แม่นยำและเป็นมาตรฐานในการทดสอบความแข็งของวัสดุ



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ความแข็งแบบ Vicker กับ การเคลือบด้วย HVOF



รูปที่ 7 เครื่องมือ Qness 60 A+ EVO

2.2 มาตรฐานของงานวิจัยนี้

การทดสอบความแข็ง(Hardness Test) ใช้มาตรฐาน ASTM E384/E92 สำหรับการทดสอบ Micro Vickers Hardness เพื่อวัดค่าความแข็งของชิ้นเคลือบการตรวจสอบโครงสร้างผิว(Scanning Electron Microscope) ใช้มาตรฐาน ASTM B748 สำหรับวัดความ Scanning Electron Microscope มาตรฐานเหล่านี้ใช้เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ และสามารถเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นได้ โดยการทดลองนี้ประกอบด้วย การทดสอบ SEM การตรวจสอบโครงสร้างผิว และการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังการเคลือบ

3. ผลการวิจัย

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 102.2 HV ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานของวัสดุฐาน ขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยเทคนิค Arc Spray และ HVOF มีค่าความแข็งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 630.8 HV และ 841.6 HV ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่าการเคลือบผิวสามารถเพิ่มความแข็งของวัสดุได้อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการเคลือบ พบว่าเทคนิค HVOF ให้ค่าความแข็งสูงที่สุด ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากลักษณะของ

กระบวนการที่มีความเร็วของอนุภาคสูง ส่งผลให้อนุภาคเคลือบสามารถยึดตัวแน่นบนพื้นผิว เกิดเป็นโครงสร้างที่มีความหนาแน่นสูงและมีปริมาณรูพรุนต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของกระบวนการพ่นเคลือบแบบความเร็วสูงที่ระบุว่า ความหนาแน่นของชั้นเคลือบและขนาดเกรนที่ละเอียดมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ

4. สรุปผล

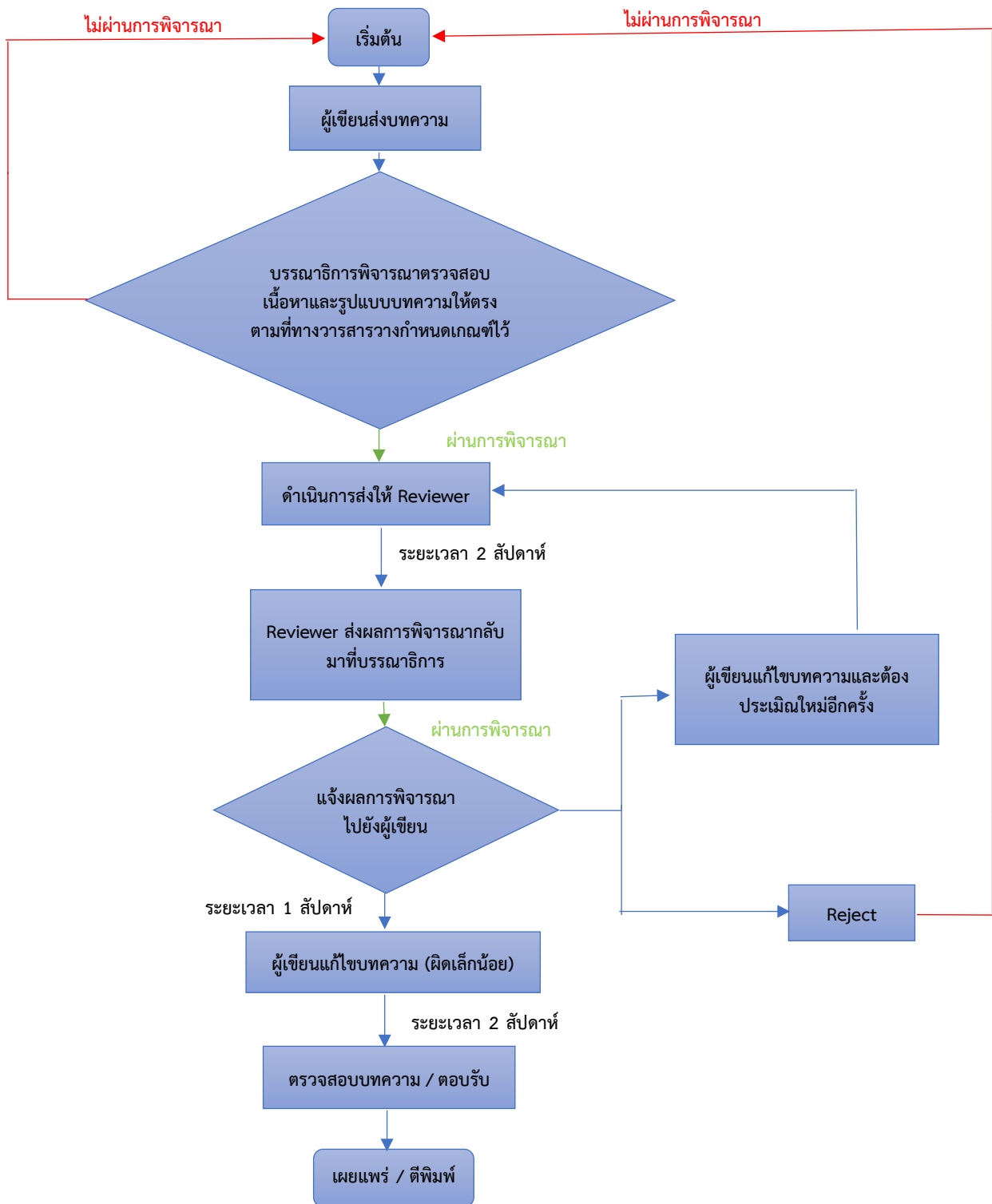
การศึกษาการพ่นเคลือบผิวชิ้นงานด้วย($\text{Ni}_{95}\text{Al}_5$) และ ($\text{WC}_{10}\text{Co}_4\text{Cr}$) ด้วยเทคนิค Thermal Spray Coating แบบ Flame Spray บนอลูมิเนียม 6061 พบว่าสามารถเพิ่มสมบัติทางกลของผิวชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยชั้นเคลือบที่ได้มีผลการวัดชั้นผิวเคลือบ 126–67 ไมโครเมตร และสามารถยึดเกาะกับวัสดุฐานได้ดีผลการทดสอบความแข็งแรงพบว่าการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 102.2 HV ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานของวัสดุฐาน ขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยเทคนิค Arc Spray และ HVOF มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 630.8 HV และ 841.6 HV ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่าการเคลือบผิวสามารถเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุได้อย่างชัดเจนมากขึ้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานได้ดีกว่า จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย SEM พบว่าชั้นเคลือบมีการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานได้ดี แม้ว่าจะพบรูพรุนและพองอากาศบางส่วน ซึ่งอาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอของค่าความแข็งแรง อย่างไรก็ตาม โดยรวมแล้วการเคลือบผิวด้วยเทคนิค Arc Spray และ HVOF เพิ่มประสิทธิภาพของผิวชิ้นงานได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรและลดต้นทุนการบำรุงรักษาได้ในอนาคต

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM International, *ASTM G99–17: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017.
- [2] ASTM International, *ASTM C1624–22: Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.
- [3] S. Sardar, S. Dey, and D. Das, “Modelling of Tribological Responses of Composites Using Integrated ANN–GA Technique,” *Journal of Composite Materials*, vol. 56, no. 3, pp. 451–465, 2022, doi: 10.1177/0021998320960520.
- [4] ASTM International, *ASTM E384–22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022 (Used for Micro Vickers Hardness Testing) (in Thai).
- [5] International Organization for Standardization, *ISO 14923:2017 Thermal Spraying — Characterization and Testing of Thermal Sprayed Coatings*, Geneva, Switzerland: ISO, 2017 (Used for Characterization and Testing of Thermal Sprayed Coatings) (in Thai).
- [6] ASTM International, *ASTM C633–13: Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2013 (Used for Adhesion Testing of Coatings) (in Thai).
- [7] International Organization for Standardization, *ISO 6507–1:2018 Metallic Materials — Vickers Hardness Test*, Geneva, Switzerland: ISO, 2018 (Used for Vickers Hardness Testing) (in Thai).

- [8] ASTM International, *ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering*, Materials Park, OH, USA: ASM International, 2016.

**ขั้นตอนการตีพิมพ์ลง
วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ**



แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ

เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ข้าพเจ้า ☐ นาย ☐ นาง ☐ นางสาว ☐ อื่นๆ (โปรดระบุ).....

.....

ชื่อ-สกุล.....

.....

(ภาษาอังกฤษ).....

.....

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

☐ อาจารย์ ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....

.....

ที่อยู่ (ที่ติดต่อได้).....

.....

โทรศัพท์ที่ทำงาน.....โทรศัพท์มือถือ.....

.....

โทรสาร.....อีเมล.....

.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง:

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

.....

.....

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ).....

.....

การตรวจสอบ ☐ ทำการลงทะเบียนและส่งวารสารในเว็บไซต์ <https://ph01.tcithaijo.org/index.php/jMMT/index>
เรียบร้อยแล้ว

วันที่ ส่งวารสารต้นฉบับ เข้าสู่ระบบออนไลน์

.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความจริง และบทความ
นี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน
นับจากวันที่ข้าพเจ้าส่งบทความ

ลงนาม.....

(.....)

วันที่เดือนพ.ศ.....

TECHNICAL ARTICLE FORM
FOR PUBLISHING ON JOURNAL OF MANUFACTURING AND MANAGEMENT TECHNOLOGY

Title ☐ Mr. ☐ Ms. ☐ Others (Please specify).....

.....

Name-Surnames

.....

Academic Positions (Please specify) ☐ Professor ☐ Associate Professor ☐ Assistant Professor ☐ Lecturer ☐

Others (Please specify).....

.....

Address (for Contact).....

.....

.....

.....

Office Phone Number..... Mobile Phone Number.....

.....

Fax Number..... E-mail.....

.....

Name of Article:.....

.....

.....

.....

.....

Submission Checklist ☐ Already register and submit on <https://ph01.tcithaijo.org/index.php/jMMT/index>

The days of Online Submission.....

.....

I promise this article belongs to me and co-authors as the name indicated in the article. In addition, this article has not been previously published on another journal. Furthermore, I will not submit this article on another journal within 60 days from the day of my submission on the JOURNAL OF MANUFACTURING AND MANAGEMENT TECHNOLOGY.

Sign

(.....)

...../...../.....



สมาคมเครือข่ายราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ดำเนินการจัดทำวารสารโดย

สมาคมเครือข่ายราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

Association of Rajamangala Network of Manufacturing and Management Technology, RNMT

เลขทะเบียนที่ ๖/๒๕๖๕ ที่ตั้ง : อาคารภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

E-mail : rnmt@en.rmutt.ac.th